

**KAJIAN PENURUNAN FONDASI KAISON UNTUK APLIKASI
PERKUATAN PERKERASAN KAKU DI ATAS TANAH LUNAK**

(Skripsi)

Oleh :

**RYAN NATANAEL USWADI
2015011007**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

KAJIAN PENURUNAN FONDASI KAISON UNTUK APLIKASI PERKUATAN PERKERASAN KAKU DI ATAS TANAH LUNAK

Oleh

RYAN NATANAEL USWADI

Tanah dasar yang lunak dapat menimbulkan masalah serius bagi konstruksi perkerasan kaku. Kondisi ini mengakibatkan penurunan pelat perkerasan yang tidak seragam sehingga perkerasan bergelombang, retak, serta muncul rongga antara perkerasan dan tanah yang melemahkan kontak perkerasan dengan tanah.

Penelitian ini bertujuan mengkaji kinerja fondasi kaison dalam melawan penurunan pelat perkerasan bila digunakan sebagai model penguat struktur perkerasan kaku dan dibandingkan kinerjanya dengan cakar ayam Sedyatmo sebagai acuan dalam pengembangan inovasi perkuatan perkerasan kaku di atas tanah lunak. Rancangan model mengadopsi sistem cakar ayam Sedyatmo hanya saja pipa-pipa beton diganti dengan kaison yang monolit dengan pelat. Penelitian berfokus pada pemilihan panjang (L), diameter (D), jarak antar kaison, dan variasi posisi pembebanan. Analisis dilakukan dengan 3D *Finite Element Method* lewat bantuan *software* PLAXIS 3D.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan model kaison sebagai alternatif cakar ayam Sedyatmo memberikan performa yang cukup baik dalam melawan penurunan pada ukuran tertentu. Ukuran $D > 0,7$ m dan $L > 2,8$ m cukup memadai dengan jarak antar kaison 2 m, ukuran $D > 0,7$ m dan $L > 4,2$ m cukup memadai dengan jarak antar kaison 2,5 m, dan ukuran $D > 0,8$ m dan $L > 4,8$ m cukup memadai dengan jarak antar kaison 3 m. Semakin besar diameter dan kedalaman kaison, penurunan pelat semakin kecil. Semakin jauh jarak antar kaison serta posisi beban dari *center line* kaison terdekat, penurunan pelat semakin besar.

Kata kunci : tanah lunak, fondasi kaison, penurunan, perkerasan kaku, cakar ayam

ABSTRACT

RESEARCH STUDY ON THE SETTLEMENT OF CAISSON FOUNDATIONS AND ITS APPLICATION FOR RIGID PAVEMENT IMPROVEMENT OVER SOFT SOIL

By

RYAN NATANAEL USWADI

Soft subgrade soils can cause serious problems for rigid pavement. This condition results in differential settlement of the pavement slab resulting in wavy pavement, cracks, and voids between the pavement and the soil that weaken the contact between pavement and soil. This research aims to study the performance of caisson foundations against pavement slab settlement when used as an improvement model for rigid pavement and compare its performance with Cakar Ayam Sedyatmo as a reference in the development of rigid pavement improvement innovations on soft soils. This model design adopted Cakar Ayam Sedyatmo but the concrete pipes were replaced with caissons which are monolithic with the slab. The research focuses on the selection of length (L), diameter (D), spacing between caissons, and variations in loading position. The analysis was conducted using 3D Finite Element Method with the help of PLAXIS 3D software. The results showed that the use of the caisson model as an alternative to Cakar Ayam Sedyatmo provides a good performance in resisting settlement at a specific size. The size of $D > 0.7$ m and $L > 2.8$ m are adequate with 2 m spacing, $D > 0.7$ m and $L > 4.2$ m are adequate with 2.5 m spacing, and $D > 0.8$ m and $L > 4.8$ m are adequate with 3 m spacing. Additionally, increasing the diameter and depth of the caisson reduces the slab settlement, while increasing the distance between the caissons and the load position increases the settlement.

Keywords: soft soil, caisson foundation, settlement, rigid pavement, cakar ayam

**KAJIAN PENURUNAN FONDASI KAISON UNTUK APLIKASI
PERKUATAN PERKERASAN KAKU DI ATAS TANAH LUNAK**

Oleh :

RYAN NATANAEL USWADI

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

Judul Skripsi

: KAJIAN PENURUNAN FONDASI KAISON
UNTUK APLIKASI PERKUATAN
PERKERASAN KAKU DI ATAS TANAH
LUNAK

Nama Mahasiswa

: Ryan Natanael Uswadi

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2015011007

Program Studi

: S1 Teknik Sipil

Fakultas

: Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



Ir. Andius Dasa Putra, S.T., M.T., Ph.D.
NIP 19731018 200012 1 001



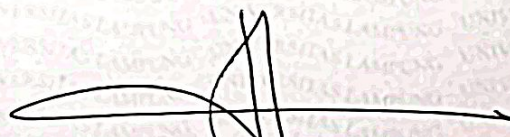
Ir. Iswan, S.T., M.T.
NIP 19720608 200501 1 001

2. Ketua Jurusan Teknik Sipil



Sasana Putra, S.T., M.T.
NIP 19691111 200003 1 002

3. Ketua Program Studi Teknik Sipil



Suyadi, S.T., M.T.
NIP 19741225 200501 1 003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

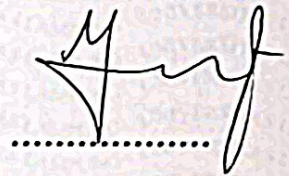
Ketua

: Ir. Andius Dasa Putra, S.T., M.T., Ph.D.



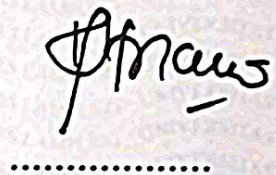
Sekretaris

: Ir. Iswan, S.T., M.T.



Penguji

Bukan Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani,
D.E.A., I.P.M., ASEAN Eng.



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.)
NIP 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 8 Juli 2024

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Ryan Natanael Uswadi
NPM : 2015011007
Prodi/Jurusan : S1 Teknik Sipil
Fakultas : Fakultas Teknik Universitas Lampung

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul "*KAJIAN PENURUNAN FONDASI KAISON UNTUK APLIKASI PERKUATAN PERKERASAN KAKU DI ATAS TANAH LUNAK*" belum pernah diajukan untuk memperoleh gelar akademik di suatu lembaga Pendidikan Tinggi, dan juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang/lembaga lain, kecuali yang secara tertulis disitasi dalam skripsi ini dan disebutkan secara lengkap dalam daftar pustaka. Ide penelitian didapat dari Pembimbing I sehingga data penelitian berada pada saya selaku penulis dan Pembimbing I yaitu Bapak Ir. Andius Dasa Putra, S.T., M.T., Ph.D

Apabila di kemudian hari hal-hal yang telah saya sampaikan sebelumnya terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai aturan yang berlaku.

Bandar Lampung, 12 Juli 2024




Ryan Natanael Uswadi

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Bandar Lampung pada tanggal 29 Mei 2002 dan merupakan anak tunggal dari pasangan Bapak Royandi dan Ibu Pauni Wijaya. Penulis memulai jenjang pendidikan tingkat dasar di SDK BPK PENABUR pada tahun 2009-2014. Selanjutnya, penulis menempuh pendidikan menengah pertama di SMPK BPK PENABUR

pada tahun 2014-2017 dan dilanjutkan menempuh pendidikan menengah atas di SMAK BPK PENABUR pada tahun 2017-2020. Pada tahun 2020 penulis diterima di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN (Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri).

Selama menjadi seorang mahasiswa, penulis berperan aktif dalam organisasi intrakampus seperti Unit Kegiatan Mahasiswa Penelitian Universitas Lampung sebagai anggota Departemen Riset dan Penalaran Periode 2020-2021 serta organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Lampung (HIMATEKS UNILA) sebagai Anggota Departemen Penelitian dan Pengembangan Periode 2021-2023. Pada masa keanggotaan di HIMATEKS UNILA, penulis dipercaya untuk menjadi Koordinator *National Paper Competition* pada acara Civil Bring Revolution 8th Unila 2023. Selain itu, penulis

juga aktif dalam salah satu organisasi non-profit ekstrakampus yaitu Pemimpin Indonesia dan dipercaya sebagai *Content Writer* pada organisasi tersebut.

Penulis telah mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) periode I di Desa Negeri Ngarip, Kecamatan Wonosobo, Kabupaten Tanggamus selama 40 hari yaitu pada Bulan Januari – Februari 2023. Di tahun yang sama, penulis juga telah melakukan kerja praktik selama 3 bulan yaitu dari Bulan Juni – September 2023. di Proyek Pembangunan *Escape Ramp* Model Jembatan *Slab on Pile* dengan Pengecoran In Situ pada Daerah Lereng sebagai Solusi Penanganan *Black Spot* Jalan Prof. Dr. Ir. Sutami dan mengambil tugas khusus mengenai analisis stabilitas lereng dengan bantuan *software* PLAXIS 2D. Penulis juga aktif mengikuti beberapa kegiatan perlombaan dan telah menorehkan beberapa prestasi seperti Juara Harapan 1 National Tender Competition CBR 7th Unila, Finalis Lomba Rancang Beton SCC Mutu Tinggi Berbahan Dasar Limbah Tingkat Internasional oleh UNS, dan Juara 2 Pilmapres Tingkat Fakultas, dan beberapa prestasi lainnya.

Untuk menyelesaikan studi penulis dalam pendidikan sarjana teknik sipil di Universitas Lampung, penulis melakukan penelitian dalam bidang geoteknik untuk pengerjaan tugas akhir (skripsi) yang berjudul **KAJIAN PENURUNAN FONDASI KAISON UNTUK APLIKASI PERKUATAN PERKERASAN KAKU DI ATAS TANAH LUNAK**. Penelitian ini mengkaji kinerja fondasi kaison (sumuran) dalam melawan penurunan pelat perkerasan bila digunakan sebagai model penguat struktur perkerasan kaku alternatif cakar di atas tanah lunak dengan bantuan *software* PLAXIS 3D. Detail lengkap mengenai hasil penelitian ini dapat ditelaah lebih mendalam pada skripsi ini.

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan kepada:

Tuhan Yesus Kristus

Hanya atas berkat, rahmat, dan karunia-Nya maka skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Biarlah hasil penelitian skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua orang yang membutuhkan dan nama-Nya dimuliakan.

Keluarga Tercinta

Bapak, Ibu, dan seluruh keluarga besar yang selalu mendoakan dan tak lelah memberikan dukungan baik secara moral maupun material.

Dosen Teknik Sipil Universitas Lampung

Seluruh dosen teknik sipil Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu berharga selama perkuliahan.

Teknik Sipil Angkatan 2020 Universitas Lampung

Teman-teman senasib seperjuangan Angkatan 2020 teknik sipil Universitas Lampung yang telah saling bahu membahu dalam melewati setiap masa mudah dan sukar dalam perkuliahan. Semoga kita semua kelak menjadi orang sukses.

Almamater Universitas Lampung

Saksi bisu perjuangan penulis dalam menuntut dan menimba ilmu. Semoga tulisan ini kelak dapat turut mengharumkan nama almamater Universitas Lampung.

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **KAJIAN PENURUNAN FONDASI KAISON UNTUK APLIKASI PERKUATAN PERKERASAN KAKU DI ATAS TANAH LUNAK** sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana strata 1 (satu) di Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini tidak akan terselesaikan tanpa adanya bantuan serta dukungan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Tuhan Yesus yang selalu memberikan rahmat dan hidayah-Nya serta senantiasa memberikan kemudahan dalam segala perkara.
2. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung.
4. Bapak Suyadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil Universitas Lampung.
5. Bapak Ir. Andius Dasa Putra, S.T., M.T., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing I yang selalu senantiasa membimbing penulis dalam pengerjaan skripsi ini. Terima kasih atas ilmu, masukan, ide, saran, serta arahan yang tidak pernah lelah dilontarkan demi tersusunnya suatu skripsi yang benar dan berkualitas.
6. Bapak Ir. Iswan, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing II yang selalu membekali penulis dengan konsep dan teori yang bermanfaat sehingga penulis tidak hanya sekadar menjalankan penelitian, namun paham dan mengerti konsep dari penelitian yang dilakukan penulis.

7. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., ASEAN Eng., selaku Dosen Penguji skripsi sekaligus Rektor Universitas Lampung yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan kritik dan saran dalam rangka penyempurnaan skripsi ini.
8. Bapak Ir. Ashruri, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik atas arahan dan strategi yang diberikan dalam menempuh dan menyelesaikan masa studi di Teknik Sipil Universitas Lampung.
9. Keluarga tercinta terutama ayah dan ibu serta seluruh keluarga besar yang selalu memberikan dukungan baik moral dan material kepada penulis. Terima kasih karena telah menjadi sosok “rumah pertama” bagi penulis yang sangat berarti hingga saat ini.
10. Seluruh dosen Program Studi S1 Teknik Sipil atas semua ilmu pengetahuan yang dicurahkan selama perkuliahan. Ilmu akan menjadi bekal bagi diri penulis sekarang dan selama-lamanya.
11. Seluruh staf akademisi Teknik Sipil Universitas Lampung yaitu Mba Suci, Mba Ida, Mba Putri, Mas Kemi, Pak Saleh yang telah membantu penulis dalam seluruh pemberkasan dan kelancaran sidang.
12. Rekan-rekan Aardewiza (Billy, Farrisqie, Sigit), rekan-rekan Slebew (Yoga, Usnul, Indah, Siti, Deya), rekan-rekan geoteknik (Adrian, David, Vanno, Jayadi, Sultan), serta beberapa kawan dekat penulis yaitu Habib, Hadi, Ragat, Akbar, Ahmad, dan Khoirul yang telah secara intens menjadi tempat penulis untuk berkeluh kesah, berdiskusi, dan saling bahu membahu dalam perkuliahan hingga penulisan skripsi ini.
13. Teman-teman KKN Desa Negeri Ngarip yaitu Eurico, Rizki, Fayza, Ghaitsa, Annisa, dan Dea yang telah memberikan dukungan moral dan motivasi kepada penulis sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
14. Seluruh teman-teman senasib dan seperjuangan Teknik Sipil Universitas Lampung Angkatan 2020 (BRINGAS 20) atas dukungan dan bantuannya selama kegiatan perkuliahan, berbagi momen suka dan duka, hingga skripsi ini terselesaikan.
15. Teman-teman Angkatan 2019 yang turut serta membantu dalam berbagi informasi dan strategi serta pengalamannya dalam penyelesaian skripsi.

16. Teman-teman Angkatan 2021 dan 2022 Teknik Sipil Universitas Lampung, terkhusus kepada Ricky, Farah, Lala, Amel, Afaf, Rifa, Alvin, Zahy, Jaya, Kinan, dan Yosi, yang terus memberikan dukungannya dalam kehadiran saat sidang skripsi penulis serta motivasi yang diberikan selama pengerjaan skripsi.
17. Teman-teman seiman di gereja khususnya kepada Daniel, Kevin, dan Angel yang telah saling menguatkan dalam doa dan ibadah.

Penulis menyadari akan keterbatasan pengetahuan dan kemampuan yang dimiliki penulis sehingga masih terdapat kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Untuk itu, penulis mengharapkan kritik dan saran dari semua pihak yang berkepentingan. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat untuk pihak yang memerlukan.

Bandar Lampung,

2024

Ryan Natanael Uswadi

DAFTAR ISI

PERSEMBAHAN.....	i
SANWACANA	ii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	6
1.6 Sistematika Penulisan.....	6
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Fondasi Kaison	8
2.2 Inovasi Sistem Perkerasan Kaku di Atas Tanah Lunak.....	11
2.2.1 Sistem Perkerasan Cakar Ayam Sedyatmo	12
2.2.2 Sistem Perkerasan Cakar Ayam Modifikasi (CAM)	16
2.2.3 Sistem Perkerasan Pelat Terpaku.....	22
2.3 Perkerasan Kaku dan Perilakunya	24
2.3.1 Distribusi Beban Roda ke Tanah Dasar.....	27
2.3.2 Pengaruh Lingkungan dan Beban Lalu Lintas.....	28
2.3.3 <i>Pumping, Faulting, dan Spalling</i>	30
2.3.4 Pengaruh Air pada Kegagalan Perkerasan.....	31
2.4 Tanah dan Klasifikasinya	32
2.5 Tanah Lunak	36
2.5.1 Klasifikasi Tanah Lunak.....	38
2.5.2 Karakteristik Tanah Lunak	39
2.5.3 Parameter Tanah Lunak	40

2.6	Pengaruh Tanah Lunak pada Konstruksi Perkerasan	44
2.7	Metode Elemen Hingga Tiga Dimensi	44
2.7.1	Diskritisasi Elemen Luasan Dasar pada Plaxis 3D	46
2.7.2	Diskritisasi Elemen Ruang pada Plaxis 3D	48
2.7.3	Model Material Elastis Linear dan Mohr Coulomb pada Plaxis 3D	49
2.8	Penelitian Terkait	53
III.	METODE PENELITIAN	57
3.1	Data Tanah Lunak	57
3.2	Instrumen Penelitian	58
3.3	Pemodelan Cakar Ayam Sedyatmo	58
3.4	Penentuan Model Perkerasan Fondasi Kaison	62
3.5	Pembebanan	67
3.6	Tahapan Analisis	69
3.6.1	Tahap Persiapan	69
3.6.2	Tahap Pengumpulan Data	70
3.6.3	Tahap Pemodelan 3D	71
3.6.4	<i>Checking</i> Pemodelan	81
3.6.5	<i>Meshing</i>	81
3.6.6	<i>Running Analysis</i>	82
3.6.7	Penyajian Hasil	83
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	85
4.1	Hasil <i>Modelling</i>	85
4.2	Perilaku dan Penurunan Cakar Ayam Sedyatmo	89
4.3	Perilaku dan Penurunan Perkerasan dengan Fondasi Kaison	97
4.4	Pengaruh Diameter dan Panjang Kaison Terhadap Penurunan Pelat ..	125
4.5	Pengaruh Posisi Pembebanan Terhadap Penurunan Pelat	135
4.6	Pengaruh Jarak Cakar Terhadap Penurunan Pelat	138
4.7	Perbandingan Kinerja Perkerasan Model Kaison dengan Cakar Ayam Sedyatmo dalam Melawan Penurunan	142
V.	PENUTUP	151
5.1	Kesimpulan	151

5.2	Saran	152
DAFTAR PUSTAKA		153

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1 Karakteristik Umum Perkerasan Kaku.....	26
Tabel 2.2 Klasifikasi Tanah AASHTO	34
Tabel 2.3 Klasifikasi Tanah USCS.....	37
Tabel 2.4 Petunjuk Identifikasi Tanah Lempung Lunak di Lapangan	38
Tabel 2.5 Klasifikasi Tanah Lunak Berdasarkan Kadar Organik	39
Tabel 2.6 Perkiraan Nilai Modulus <i>Young</i> (E) Tanah Lunak.....	41
Tabel 2.7 Berat Jenis (G_s) Tanah Lunak	41
Tabel 2.8 <i>Poisson Ratio</i> (ν) Tanah Lunak.....	42
Tabel 2.9 Nilai Kuat Geser <i>Undrained</i> (C_u) Tanah Lunak.....	42
Tabel 2.10 Kohesi (c) Tanah Lunak.....	43
Tabel 2.11 Kuat Tekan Bebas (q_u) Tanah Lunak	43
Tabel 2.12 Penelitian terkait.....	55
Tabel 3.1 Uji <i>Soil Properties</i> dan <i>Soil Engineering</i> Tanah Lunak Waru.....	57
Tabel 3.2 Acuan Penentuan Lebar Pelat	61
Tabel 3.3 Model Penelitian dengan Parameter D, d, dan L yang Berbeda	64
Tabel 4.1 Penurunan Maksimum Pelat pada Cakar Ayam Sedyatmo untuk Berbagai Posisi Pembebanan	92
Tabel 4.2 Penurunan Maksimum Pelat pada Setiap Model Penelitian untuk Susunan Kaison Konfigurasi I	118
Tabel 4.3 Penurunan Maksimum Pelat pada Setiap Model Penelitian untuk Susunan Kaison Konfigurasi II	118
Tabel 4.4 Penurunan Maksimum Pelat pada Setiap Model Penelitian untuk Susunan Kaison Konfigurasi III.....	119
Tabel 4.5 Perbandingan Kinerja Model Kaison Konfigurasi I dengan Model Cakar Ayam Sedyatmo	147
Tabel 4.6 Perbandingan Kinerja Model Kaison Konfigurasi II dengan Model Cakar Ayam Sedyatmo	147
Tabel 4.7 Perbandingan Kinerja Model Kaison Konfigurasi III dengan Model Cakar Ayam Sedyatmo	148

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Kaison terbuka (Hardiyatmo, 2020).	9
Gambar 2.2 Kaison apung (Hardiyatmo, 2020).	10
Gambar 2.3 Kaison pneumatik (Hardiyatmo, 2020).	11
Gambar 2.4 Model sistem perkerasan cakar ayam Sedyatmo (Hardiyatmo, 2019b)	14
Gambar 2.5 Mekanisme perlawanan cakar (Hardiyatmo, 2019b).	16
Gambar 2.6 Model perkerasan cakar ayam modifikasi (Hardiyatmo dan Suhendro, 2010).	18
Gambar 2.7 <i>Suhendro Charts</i>	21
Gambar 2.8 Model sistem perkerasan pelat terpaku (Hardiyatmo, 2008).	23
Gambar 2.9 Komponen lapis perkerasan kaku.	26
Gambar 2.10 Distribusi beban roda pada perkerasan kaku.	27
Gambar 2.11 <i>Wrapping stress</i> akibat cuaca dan pembebanan berulang.	29
Gambar 2.12 Proses terjadinya <i>pumping</i> , <i>spalling</i> , dan <i>faulting</i>	31
Gambar 2.13 Diskritisasi elemen.	45
Gambar 2.14 Elemen segitiga 6 nodal, penomoran lokal, posisi titik nodal (o) titik integrasi (x), dan fungsi <i>shape</i>	47
Gambar 2.15 Elemen segitiga 15 nodal, penomoran lokal, posisi titik nodal (o) titik integrasi (x), dan fungsi <i>shape</i>	48
Gambar 2.16 Elemen <i>interface</i> , penomoran lokal, posisi titik nodal (o) dan titik integrasi (x).	48
Gambar 2.17 Elemen tetrahedral 10 nodal, penomoran lokal, posisi titik nodal (o) titik integrasi (x), dan fungsi <i>shape</i>	49
Gambar 2.18 Fungsi leleh Mohr-Coulomb dalam ruang <i>principal stress</i>	52
Gambar 2.19 Model konfigurasi fondasi kaison (Aspar <i>et al</i> , 2010).	53
Gambar 3.1 Tipikal asli cakar ayam Sedyatmo (Hardiyatmo dan Suhendro, 2010).	59
Gambar 3.2 Tampak tiga dimensi cakar ayam Sedyatmo.	60
Gambar 3.3 Tampak atas cakar ayam Sedyatmo.	60

Gambar 3.4	Potongan.melintang pelat dan cakar ayam Sedyatmo.	60
Gambar 3.5	Panjang truk pada SNI 1725-2016.	62
Gambar 3.6	Tampak tiga dimensi perkerasan dengan fondasi kaison.	65
Gambar 3.7	Tampak atas perkerasan dengan fondasi kaison.....	66
Gambar 3.8	Potongan melintang perkerasan dan fondasi kaison.....	66
Gambar 3.9	Aturan pembebanan Manual Perkerasan Jalan dengan Alat Benkelman beam no. 01/MN/BM/93).	68
Gambar 3.10	Posisi pembebanan pada pelat.	69
Gambar 3.11	<i>Mind mapping</i> tahap persiapan penelitian.	70
Gambar 3.12	<i>Tab project</i> pada pengaturan lembar kerja.	72
Gambar 3.13	<i>Tab model</i> pada pengaturan lembar kerja.....	72
Gambar 3.14	Menu <i>borehole</i> untuk pemodelan geometri tanah.	73
Gambar 3.15	<i>Tab general</i> pada <i>input</i> parameter tanah.	74
Gambar 3.16	<i>Tab mechanical</i> pada <i>input</i> parameter tanah.	74
Gambar 3.17	<i>Tab interface</i> pada <i>input</i> parameter tanah.	75
Gambar 3.18	<i>Tab initial</i> pada <i>input</i> parameter tanah.	76
Gambar 3.19	Tahapan proses pembuatan model perkerasan.	77
Gambar 3.20	<i>Tab general</i> pada <i>input</i> parameter beton (kiri) dan siklop (kanan).	78
Gambar 3.21	<i>Tab mechanical</i> pada <i>input</i> parameter beton (kiri) dan siklop (kanan).	79
Gambar 3.22	<i>Tab interface</i> pada <i>input</i> parameter beton (kiri) dan siklop (kanan).	80
Gambar 3.23	Tiga variasi posisi pembebanan pada model.	80
Gambar 3.24	Pengaturan <i>meshing</i> model sebelum analisis.	81
Gambar 3.25	Menu <i>stage construction</i> sebelum <i>running analysis</i>	83
Gambar 3.26	<i>Flowchart penelitian</i>	84
Gambar 4.1	Tipikal elemen <i>meshing</i> (kiri) dan nodal (kanan) pada tanah model perkerasan Sedyatmo.....	87
Gambar 4.2	Tipikal elemen <i>meshing</i> (kiri) dan nodal (kanan) pada pelat dan cakar model perkerasan Sedyatmo.	87
Gambar 4.3	Kualitas <i>meshing</i> pada model perkerasan Sedyatmo.	87
Gambar 4.4	Tipikal elemen <i>meshing</i> (kiri) dan nodal (kanan) pada tanah salah satu model perkerasan dengan fondasi kaison.	88

Gambar 4.5	Tipikal elemen <i>meshing</i> (kiri) dan nodal (kanan) pada pelat dan cakar salah satu model perkerasan dengan fondasi kaison.	88
Gambar 4.6	Kualitas <i>meshing</i> pada salah satu model perkerasan dengan fondasi kaison.	88
Gambar 4.7	Letak potongan pelat cakar ayam Sedyatmo yang ditinjau besar penurunannya.	89
Gambar 4.8	Penurunan sepanjang pelat CA Sedyatmo potongan memanjang.	90
Gambar 4.9	Penurunan sepanjang pelat CA Sedyatmo potongan melintang.	91
Gambar 4.10	Pola pergerakan tanah dasar di bawah pelat.	93
Gambar 4.11	Distribusi penurunan pada pelat dan tanah saat beban di pusat cakar.	94
Gambar 4.12	Distribusi penurunan pada pelat dan tanah saat beban di antara dua cakar.	95
Gambar 4.13	Distribusi penurunan pada pelat dan tanah saat beban di antara empat cakar.	96
Gambar 4.14	Letak potongan model perkerasan dengan fondasi kaison konfigurasi I yang ditinjau besar penurunannya.	98
Gambar 4.15	Letak potongan model perkerasan dengan fondasi kaison konfigurasi II yang ditinjau besar penurunannya.	99
Gambar 4.16	Letak potongan model perkerasan dengan fondasi kaison konfigurasi III yang ditinjau besar penurunannya.	99
Gambar 4.17	Penurunan sepanjang pelat model perkerasan dengan fondasi kaison konfigurasi I untuk beban di pusat kaison (potongan memanjang)	100
Gambar 4.18	Penurunan sepanjang pelat model perkerasan dengan fondasi kaison konfigurasi I untuk beban di antara dua kaison (potongan memanjang).	101
Gambar 4.19	Penurunan sepanjang pelat model perkerasan dengan fondasi kaison konfigurasi I untuk beban di antara empat kaison (potongan memanjang).	102
Gambar 4.20	Penurunan sepanjang pelat model perkerasan dengan fondasi kaison konfigurasi I untuk beban di pusat kaison (potongan melintang).	103
Gambar 4.21	Penurunan sepanjang pelat model perkerasan dengan fondasi kaison konfigurasi I untuk beban di antara dua kaison (potongan melintang).	104

Gambar 4.22	Penurunan sepanjang pelat model perkerasan dengan fondasi kaison konfigurasi I untuk beban di antara empat kaison (potongan melintang).....	105
Gambar 4.23	Penurunan sepanjang pelat model perkerasan dengan fondasi kaison konfigurasi II untuk beban di pusat kaison (potongan memanjang)	106
Gambar 4.24	Penurunan sepanjang pelat model perkerasan dengan fondasi kaison konfigurasi II untuk beban di antara dua kaison (potongan memanjang).....	107
Gambar 4.25	Penurunan sepanjang pelat model perkerasan dengan fondasi kaison konfigurasi II untuk beban di antara empat kaison (potongan memanjang).....	108
Gambar 4.26	Penurunan sepanjang pelat model perkerasan dengan fondasi kaison konfigurasi II untuk beban di pusat kaison (potongan melintang).....	109
Gambar 4.27	Penurunan sepanjang pelat model perkerasan dengan fondasi kaison konfigurasi II untuk beban di antara dua kaison (potongan melintang).....	110
Gambar 4.28	Penurunan sepanjang pelat model perkerasan dengan fondasi kaison konfigurasi II untuk beban di antara empat kaison (potongan melintang).....	111
Gambar 4.29	Penurunan sepanjang pelat model perkerasan dengan fondasi kaison konfigurasi III untuk beban di pusat kaison (potongan memanjang).	112
Gambar 4.30	Penurunan sepanjang pelat model perkerasan dengan fondasi kaison konfigurasi III untuk beban di antara dua kaison (potongan memanjang).....	113
Gambar 4.31	Penurunan sepanjang pelat model perkerasan dengan fondasi kaison konfigurasi III untuk beban di antara empat kaison (potongan memanjang).....	114
Gambar 4.32	Penurunan sepanjang pelat model perkerasan dengan fondasi kaison konfigurasi III untuk beban di pusat kaison (potongan melintang).....	115
Gambar 4.33	Penurunan sepanjang pelat model perkerasan dengan fondasi kaison konfigurasi III untuk beban di antara dua kaison (potongan melintang).....	116
Gambar 4.34	Penurunan sepanjang pelat model perkerasan dengan fondasi kaison konfigurasi III untuk beban di antara empat kaison (potongan melintang).....	117
Gambar 4.35	Pola pergerakan tanah dasar di bawah pelat pada salah satu model perkerasan dengan fondasi kaison.	121

Gambar 4.36	Distribusi penurunan pada pelat dan tanah pada salah satu model perkerasan kaison saat beban di pusat kaison.....	122
Gambar 4.37	Distribusi penurunan pada pelat dan tanah pada salah satu model perkerasan kaison saat beban di antara dua kaison.	123
Gambar 4.38	Distribusi penurunan pada pelat dan tanah pada salah satu model perkerasan kaison saat beban di antara empat kaison.	124
Gambar 4.39	Pengaruh diameter dan panjang kaison terhadap penurunan pelat maksimum konfigurasi I untuk rasio $L/D = 4$	125
Gambar 4.40	Pengaruh diameter dan panjang kaison terhadap penurunan pelat maksimum konfigurasi I untuk rasio $L/D = 5$	126
Gambar 4.41	Pengaruh diameter dan panjang kaison terhadap penurunan pelat maksimum konfigurasi I untuk rasio $L/D = 6$	126
Gambar 4.42	Pengaruh diameter dan panjang kaison terhadap penurunan pelat maksimum konfigurasi II untuk rasio $L/D = 4$	127
Gambar 4.43	Pengaruh diameter dan panjang kaison terhadap penurunan pelat maksimum konfigurasi II untuk rasio $L/D = 5$	127
Gambar 4.44	Pengaruh diameter dan panjang kaison terhadap penurunan pelat maksimum konfigurasi II untuk rasio $L/D = 6$	128
Gambar 4.45	Pengaruh diameter dan panjang kaison terhadap penurunan pelat maksimum konfigurasi III untuk rasio $L/D = 4$	128
Gambar 4.46	Pengaruh diameter dan panjang kaison terhadap penurunan pelat maksimum konfigurasi III untuk rasio $L/D = 5$	129
Gambar 4.47	Pengaruh diameter dan panjang kaison terhadap penurunan pelat maksimum konfigurasi III untuk rasio $L/D = 6$	129
Gambar 4.48	Pergeseran kaison ketika dibebani.....	131
Gambar 4.49	Diagram gaya pada perkerasan.....	131
Gambar 4.50	Mekanisme reduksi penurunan pelat akibat kenaikan diameter dan panjang kaison.	135
Gambar 4.51	Ilustrasi proses peningkatan penurunan pelat akibat posisi pembebanan (angka dalam lingkaran menunjukkan urutan proses).....	137
Gambar 4.52	Mekanisme peningkatan peningkatan penurunan pelat akibat bertambah jauhnya posisi beban dari <i>center line</i> kaison terdekat	138
Gambar 4.53	Pengaruh jarak antar kaison terhadap penurunan untuk beban di pusat kaison.	139
Gambar 4.54	Pengaruh jarak antar kaison terhadap penurunan untuk beban di antara dua kaison.	139

Gambar 4.55	Pengaruh jarak antar kaison terhadap penurunan untuk beban di antara empat kaison.	140
Gambar 4.56	Definisi A_{ps} pada pelat.	141
Gambar 4.57	Mekanisme peningkatan penurunan pelat akibat jarak antar kaison semakin jauh.	142
Gambar 4.58	Perbandingan persentase kinerja model kaison dengan cakar ayam Sedyatmo konfigurasi I.	148
Gambar 4.59	Perbandingan persentase kinerja model kaison dengan cakar ayam Sedyatmo konfigurasi II.	149
Gambar 4.60	Perbandingan persentase kinerja model kaison dengan cakar ayam Sedyatmo konfigurasi III.	149

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Lapis konstruksi perkerasan jalan kaku konvensional umumnya mengandalkan kemampuan tanah dasar (*subgrade*) dan kekakuan beton perkerasan untuk menumpu beban lalu lintas di atasnya (Aprizal et al., 2021). Jika tanah dasar cukup kuat untuk menahan beban, tidak akan ada masalah pada lapis perkerasan di atasnya. Seringkali permasalahan ditemukan pada tanah dasar yang lunak (Afriani, L., & Juansyah, Y, 2016). Tanah dasar yang lunak menyebabkan penurunan tanah menjadi tidak seragam (*differential settlement*) pada arah melintang trase jalan sebagai akibat dari distribusi beban yang tidak merata. Perilaku ekspansif sering ditemukan pada tanah lunak dan mengakibatkan perkerasan menderita tekanan pengembangan (*swelling pressures*) yang mengakibatkan perkerasan mudah mengalami retak dan patah lelah (Nugroho et al., 2019). Hal ini menyebabkan perkerasan menjadi bergelombang dan menurunkan masa layannya. Dalam situasi tertentu, tanah lunak menjadi sangat labil dan berair. Kondisi muka air tinggi dapat menimbulkan gaya angkat.

Berbagai teknologi dan pengembangan inovasi telah dilakukan untuk mengatasi masalah perkerasan kaku di atas tanah lunak. Beberapa teknologi yang telah dikembangkan adalah sistem fondasi cakar ayam, sistem fondasi cakar ayam modifikasi, dan sistem pelat terpaku (*Nailed-Slab System*). Secara garis besar, sistem perkerasan cakar ayam yang diusulkan oleh Sedyatmo tersusun dari sebuah pelat tipis beton bertulang yang diperkaku dengan pipa-pipa beton yang monolit dengan pelat dan tertancap pada lapisan *subgrade* lunak. Pipa beton ini bertindak seperti angkur (paku) antara pelat dengan tanah. Sistem ini menjamin kontak antara tanah dengan pelat dan mencegah

terjadinya rongga di antaranya ketika terjadi penurunan tanah sehingga perkerasan lebih awet (Hardiyatmo, 2014). Akan tetapi, sistem ini memiliki massa yang cukup besar dan pelaksanaannya cukup sulit karena terdapat banyak susunan tulangan di bawah pelat.

Selanjutnya, dikembangkan sistem cakar ayam generasi baru yaitu cakar ayam modifikasi oleh Suhendro, Maryadi, dan Hardiyatmo. Sistem ini mengganti pipa beton menjadi pipa baja galvanis yang lebih ringan, penambahan sistem koperan di tepi pelat, dan penambahan lapisan aspal tipis di atas pelat. Hasil pengujian skala penuh pada tanah lunak lempung Waru, Surabaya yang divalidasikan dengan pemodelan numeris menunjukkan performa yang lebih baik dalam melawan deformasi dan perilaku ekspansif tanah dengan metode pelaksanaan yang lebih mudah (Suhendro, 2005). Dalam rangka efisiensi pelaksanaan kerja, dikembangkan model alternatif yaitu sistem pelat terpaku (*nailed-slab system*) oleh Hardiyatmo. Sistem ini muncul sebagai ide untuk mengganti cakar ayam beton dengan tiang-tiang friksi yang pendek dan kurus berbahan beton bertulang (Hardiyatmo, 2008).

Performa sistem pelat terpaku dan cakar ayam sangat dipengaruhi oleh perencanaan yang akurat serta metode pelaksanaan yang tepat. Selain itu, daerah dengan muka air tanah tinggi cenderung menyulitkan pelaksanaan kerja dan menurunkan performa sistem dalam melawan deformasi tanah. Kondisi muka air tinggi dapat menimbulkan gaya angkat (*uplift*) dan memperparah tekanan pengembangan (*swelling*) pada pelat (Ikbar, 2020). Dalam metode pelaksanaan konvensional biasanya akan dilakukan proses *dewatering* untuk mengeluarkan air dari daerah konstruksi sehingga muka air tanah turun dan pekerjaan mudah dilaksanakan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kinerja fondasi kaison (sumuran) dalam melawan penurunan pelat perkerasan bila digunakan sebagai model penguat struktur perkerasan kaku alternatif cakar di atas tanah lunak. Konsep ini muncul sebagai ide alternatif untuk memperkuat sistem pelat perkerasan pada tanah yang lunak dan berair (muka air tinggi). Fondasi kaison pada

umumnya cocok digunakan untuk tanah dengan kondisi muka air tinggi (Susanty & Astuti, 2000). Rancangan model sistem perkerasan kaku dengan fondasi kaison yang diteliti mengadopsi model sistem pelat terpaku, cakar ayam, dan cakar ayam modifikasi. Hanya saja pipa-pipa beton atau pipa-pipa baja galvanis digantikan dengan fondasi kaison yang monolit dengan pelat. Penggantian ini bertujuan untuk memudahkan pelaksanaan konstruksi pelat di atas tanah lunak dan menjamin kinerja pelat dalam melawan penurunan serta gaya angkat pada pelat. Penelitian berfokus pada pemilihan dimensi panjang, diameter, dan jarak antar kaison pada konfigurasi persegi panjang dalam melawan penurunan pelat dan dibandingkan dengan sistem cakar ayam Sedyatmo yang merupakan acuan mutlak dalam pengembangan model inovasi perkerasan kaku di atas tanah lunak saat ini. Pembebanan dilakukan pada tiga kondisi pembebanan yaitu di pusat kaison, di antara dua kaison, dan di antara empat kaison. Analisis dilakukan dengan *3D Finite Element Method* dan *Soil-Structure Interaction* lewat bantuan *software* Plaxis 3D.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian yang telah dijelaskan di atas, maka rumusan masalah yang dibuat pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh variasi diameter dan kedalaman fondasi kaison terhadap penurunan pelat di atas tanah lunak?
2. Bagaimana pengaruh posisi pembebanan pada pelat terhadap penurunan di atas tanah lunak?
3. Bagaimana pengaruh jarak antar kaison pada konfigurasi persegi panjang terhadap kinerja pelat dalam melawan penurunan di atas tanah lunak?
4. Bagaimana performa sistem perkerasan kaku dengan fondasi kaison dan perbandingan kinerjanya dengan sistem cakar ayam Sedyatmo yang merupakan acuan mutlak dalam pengembangan inovasi perkerasan kaku saat melawan deformasi (penurunan) di atas tanah lunak?

1.3 Tujuan Penelitian

Mengacu pada rumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini dijelaskan sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh variasi diameter dan kedalaman fondasi kaison terhadap penurunan pelat di atas tanah lunak.
2. Mengetahui pengaruh posisi pembebanan pada pelat terhadap penurunan di atas tanah lunak.
3. Mengetahui pengaruh jarak antar kaison pada konfigurasi persegi panjang terhadap kinerja pelat dalam melawan penurunan di atas tanah lunak.
4. Menguji performa model sistem perkerasan kaku dengan fondasi kaison dan membandingkan kinerjanya dengan sistem cakar ayam Sedyatmo yang merupakan acuan mutlak dalam pengembangan inovasi perkerasan kaku saat melawan deformasi (penurunan) di atas tanah lunak.

1.4 Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah yang ditetapkan pada penelitian ini dijelaskan sebagai berikut.

1. Kajian hanya difokuskan pada nilai penurunan pelat yang terjadi akibat penggunaan fondasi kaison sebagai alternatif cakar di bawah pelat perkerasan kaku dan perbandingannya dengan penurunan pelat yang dihasilkan oleh cakar ayam Sedyatmo.
2. Data tanah lunak yang dipakai merupakan data sekunder dan merupakan tanah yang sama dengan tanah pengujian uji *full-scale modelling* sistem cakar ayam dan cakar ayam modifikasi yaitu tanah lempung Waru, Surabaya.
3. Analisis dilakukan secara numeris dengan metode 3D *Finite Element Method* dengan *software* Plaxis 3D dan *Soil-Structure Interaction*.
4. Dimensi pelat yang digunakan berukuran 8 x 20 m. Lebar 8 m digunakan untuk menyesuaikan dengan ukuran lebar dua lajur jalan arteri primer tipe 8/2 T pada Persyaratan Teknis Jalan PUPR. Panjang 20 m

menyesuaikan ukuran panjang kendaraan truk pada SNI 1725-2016 untuk Pembebanan Jembatan dengan ruang bebas di sekitarnya.

5. Bentuk fondasi kaison yang dipilih adalah lingkaran tunggal.
6. Tebal pelat perkerasan disamakan dengan tebal perkerasan Cakar Ayam Sedyatmo sebesar 15 cm. Tebal ini dipertahankan agar karakteristik dari Cakar Ayam Sedyatmo tetap teradopsi pada model perkerasan dengan fondasi kaison yang akan dianalisis.
7. Pembebanan yang bekerja merupakan beban muatan sumbu tunggal terberat pada truk trailer muatan terbesar menurut Manual Perkerasan Jalan dengan Alat Benkelman Beam No.01/MN/BM/83. Untuk truk trailer konfigurasi 1,2 – 2,2 dengan berat total maksimum 42 ton, maka muatan sumbu tunggal terberat terletak pada sumbu belakang sebesar 54% dari berat total yaitu 22,68 ton (statis).
8. Posisi pembebanan dilakukan pada tiga variasi posisi pada pelat yaitu tepat pada pusat kaison, di antara dua kaison, dan di antara empat kaison.
9. Perbandingan panjang (L) dengan diameter (D) kaison dibatasi pada nilai $4 \leq L/D \leq 6$. Nilai $L/D \geq 4$ dipilih sesuai dengan persyaratan $D_f/B \geq 4$ untuk pondasi kaison menurut Bowles (1997) dimana D_f merupakan kedalaman dan B adalah lebar/diameter fondasi. Nilai $L/D \leq 6$ dipilih dengan mempertimbangkan ukuran kaison terbesar yang mampu dibuat dalam pelat berdimensi 20 x 8 m.
10. Diameter luar fondasi kaison divariasikan dalam rentang 0,5 – 0,8 m dan panjang fondasi kaison divariasikan dalam rentang 2,0 – 4,8 m dengan memperhatikan nilai rasio L/D yang dibatasi pada poin 9. Panjang fondasi kaison terkecil dipilih sebesar 2,0 m mempertimbangkan panjang kedalaman cakar yang disarankan oleh Sedyatmo dalam desain pertama cakar ayam Sedyatmo sebesar 2,0 m. Nilai diameter luar terkecil dipilih sebesar 0,5 m dengan mempertimbangkan syarat $D = \frac{1}{4} L$ untuk fondasi kaison dimana L terkecil untuk penelitian ini dipilih sebesar 2,0 m. Nilai variasi panjang fondasi terbesar dipilih sebesar 4,8 m dengan mempertimbangkan besarnya diameter maksimum yang mampu disusun di dalam pelat berdimensi 20 x 8 m.

11. Variasi jarak antar kaison yang dimaksud merupakan variasi jarak antar as pusat kaison dalam arah vertikal dan horizontal serta dibatasi pada bentuk konfigurasi persegi panjang. Jarak antar kaison divariasikan sebesar 2 m, 2,5 m, dan 3 m.
12. Penelitian tidak menganalisis dari segi biaya.
13. Penelitian tidak menganalisis gaya dalam berupa momen dan lintang yang terjadi pada pelat perkerasan.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memberikan manfaat sebagai berikut.

1. Mendapatkan suatu model alternatif sistem perkerasan kaku dengan memanfaatkan fondasi kaison untuk konstruksi perkerasan kaku di atas tanah lunak.
2. Menambah wawasan di lingkungan akademisi dan praktisi terkait perilaku dan karakteristik fondasi kaison bila diterapkan sebagai model alternatif penguat sistem perkerasan kaku di atas tanah lunak.
3. Tanggungjawab peneliti dalam meraih gelar sarjana S1 Teknik Sipil.

1.6 Sistematika Penulisan

Runtutan sistematika penulisan dalam proposal penelitian ini dijelaskan sebagai berikut.

1. BAB I PENDAHULUAN

Bab ini memaparkan mengenai latar belakang penelitian, rumusan masalah sebagai arah dari jalannya penelitian, tujuan penelitian yang ingin dicapai, batasan masalah yang diterapkan, dan manfaat dari penelitian yang dilakukan.

2. BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini memaparkan tentang landasan teori terkait dengan penelitian yang dilakukan serta penelitian terdahulu yang serupa dan dapat menjadi referensi untuk penelitian ini.

3. BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini memaparkan tentang alur penelitian, kebutuhan alat dan bahan, serta variabel penelitian dengan rinci.

4. BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini memaparkan hasil dari kegiatan penelitian yang telah dilakukan dan pembahasannya.

5. BAB V PENUTUP

Bab ini memaparkan kesimpulan akhir dari hasil penelitian sebagai jawaban dari setiap rumusan masalah yang telah dibuat pada awal penelitian.

6. DAFTAR PUSTAKA

Bab ini memaparkan tentang seluruh referensi/acuan yang digunakan dalam penyusunan skripsi

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Fondasi Kaison

Dalam perencanaan suatu struktur bangunan maupun perencanaan jalan, pemilihan jenis fondasi menjadi suatu tahapan yang harus dilakukan dengan teliti. Pemilihan fondasi dilakukan berdasarkan fungsi bangunan atas (*upper structure*), besarnya beban, beratnya bangunan atas, keadaan tanah dimana bangunan tersebut didirikan dan tinjauan dari segi ekonomi.. Jika tanah keras terletak pada kedalaman yang relatif dalam, maka fondasi kaison dapat dijadikan opsi dalam pemilihan fondasi.

Beberapa ahli geoteknik memberikan pengertian terhadap fondasi kaison sebagai berikut.

1. Sosrodarsono & Nakazawa (2000) mendefinisikan kaison merupakan fondasi beton bertulang yang sengaja ditenamkan ke dalam tanah akibat beratnya sendiri dengan dibantu oleh penggalian tanah galian pada dasar fondasi dan diletakkan pada lapisan tanah yang kokoh berdasarkan hasil pengujian. Lokasi tanah untuk fondasi kaison biasanya tidak terlalu dangkal dan berada dalam rentang dalam sampai sangat dalam.
2. Punmia et al. (2017) mendefinisikan kaison merupakan fondasi yang didesain menyerupai sumuran dengan bermacam konfigurasi bentuk seperti kotak, lingkaran, atau persegi panjang yang sengaja ditenamkan sampai kedalaman permukaan tanah yang direncanakan.
3. Teng (1980) mendefinisikan kaison merupakan struktur fondasi bawah yang dibuat secara *in situ* dan sengaja ditenggelamkan ke dalam tanah berair atau permukaan air sampai kedalaman yang dituju.
4. Bowles (1997) menjelaskan bahwa secara kuantitatif, jika kedalaman

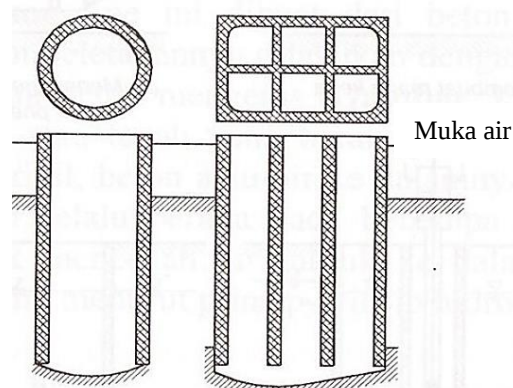
fondasi kaison (D_f) dibandingkan dengan lebar fondasinya (B), maka fondasi kaison memiliki nilai $D_f/B \geq 4$.

Secara garis besar, dapat ditarik kesimpulan bahwa fondasi kaison merupakan merupakan jenis fondasi peralihan antara fondasi dangkal dan fondasi dalam yang didesain menyerupai sumuran dengan rasio $D_f/B \geq 4$ yang dipasang dengan cara membenamkan pondasi sampai kedalaman yang dituju. Istilah lain seperti fondasi sumuran dan kaison bor merupakan ragam penyebutan lain untuk fondasi kaison (Hardiyatmo, 2020).

Menurut Hardiyatmo (2020) terdapat beberapa jenis fondasi kaison yaitu fondasi kaison terbuka, kaison pneumatik, dan kaison apung.

1. Kaison terbuka

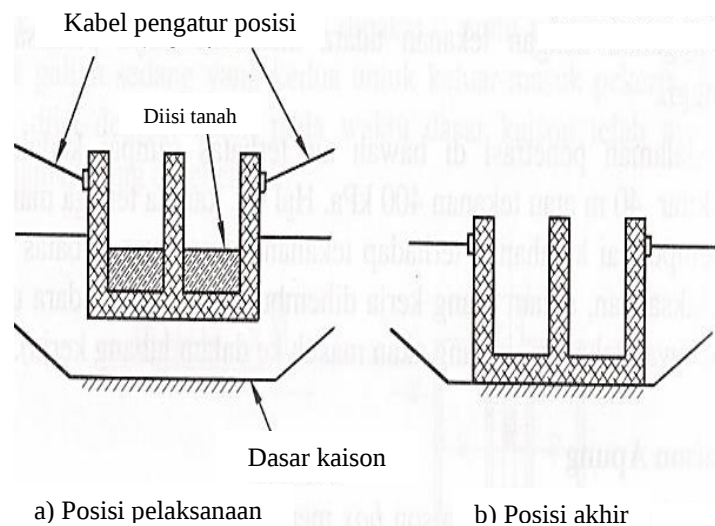
Bentuk umum kaison terbuka adalah silinder/kotak yang terbuka pada bagian atas dan bawah selama konstruksi berlangsung. Bentuk umum kaison terbuka dapat dilihat pada Gambar 2.1. Pembuatan fondasi kaison jenis ini dilakukan dengan dua cara yaitu pengecoran *in-situ* dan *prefabricated*. Bagian tengah fondasi kaison berbentuk ruang/lubang. Bahan dinding fondasi terbuat dari kayu, beton, atau batu pecah dan biasanya diletakan pada tanah dengan muka air cukup dalam. Dalam pelaksanaannya, fondasi kaison dibenamkan oleh beratnya sendiri secara perlahan ke dalam tanah disertai dengan penggalian. Setelah fondasi mencapai tanah dasar, bagian dasar fondasi akan dicor beton dan ditutup.



Gambar 2. 1 Kaison terbuka (Hardiyatmo, 2020).

2. Kaison apung

Berbeda dengan kaison terbuka, kaison apung sengaja didesain tertutup pada bagian dasarnya sehingga akan mengapung di atas air atau tanah berair pada saat instalasi. Kaison ini dibentuk di daratan dengan material beton bertulang kemudian dibenamkan dengan cara diapungkan secara perlahan pada permukaan. Pembedaman dilakukan dengan mengikat fondasi kaison dengan tali untuk mengatur posisi fondasi tetap seimbang. Selanjutnya, ke dalam ruang fondasi diisi pasir, kerikil, beton, atau tanah sehingga fondasi akan terbenam secara perlahan ke dasar tanah yang direncanakan. Tipikal model desain kaison apung ditampilkan pada Gambar 2.2.

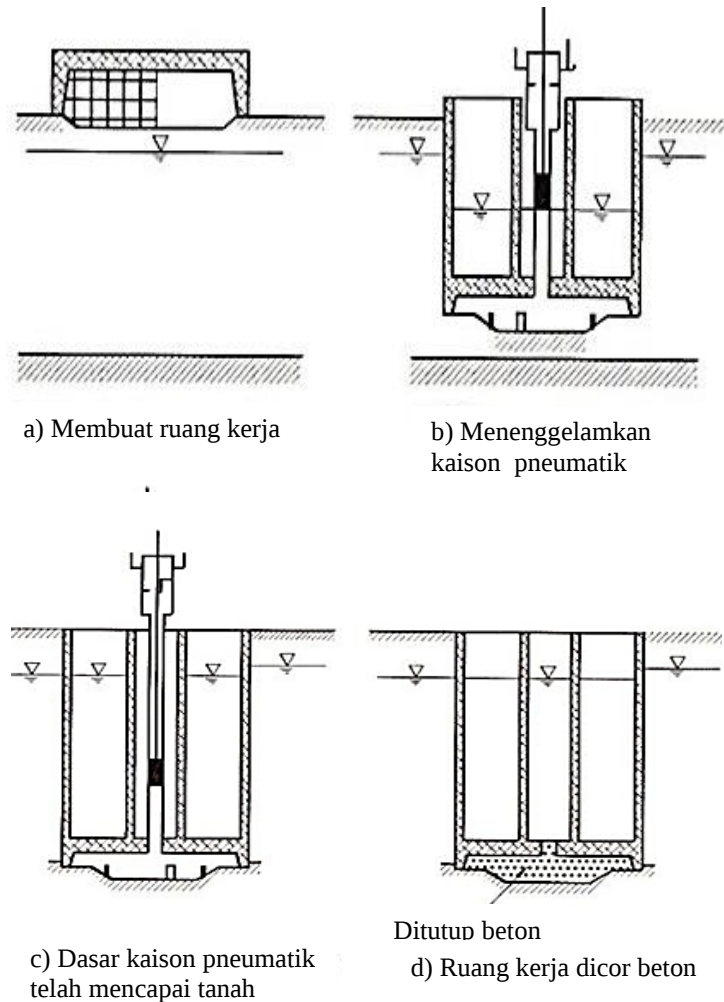


Gambar 2. 2 Kaison apung (Hardiyatmo, 2020).

3. Kaison pneumatik

Sesuai dengan namanya, kaison pneumatik memiliki ruang dalam fondasi yang bertekanan. Ruang dalam kaison didesain memiliki tekanan yang lebih tinggi dari tekanan udara di lingkungan. Selama proses penggalian, udara bertekanan dialirkan terus menerus ke dalam area kerja penggalian. Tanah bisa saja masuk ke area kerja saat penggalian. Oleh karena itu, tekanan udara saat penggalian berlangsung harus didesain sama dengan tekanan air tanah untuk mencegah tanah masuk ke area kerja. Ketika

fondasi kaison telah mencapai tanah dasar, area kerja diisi cor beton di dasar. Fondasi kaison pneumatik lebih sering diaplikasikan pada daerah berair. Bentuk dari kaison pneumatik ditampilkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Kaison pneumatik (Hardiyatmo, 2020).

2.2 Inovasi Sistem Perkerasan Kaku di Atas Tanah Lunak

Pada prinsipnya, makin buruk kualitas dan daya dukung tanah dasarnya, maka perkerasan harus semakin tebal. Oleh karena itu, semakin lunak tanah dasar, perkerasan yang dibutuhkan sangat tebal. Hal ini berdampak pada tingginya biaya konstruksi (Fahlefi et al., 2020). Untuk menciptakan konstruksi yang efisien, namun tetap memiliki kinerja yang baik dalam menerima pembebanan, beberapa inovasi berikut kemudian dikembangkan

meliputi inovasi sistem perkerasan cakar ayam, sistem perkerasan cakar ayam modifikasi, dan sistem perkerasan pelat terpaku yang akan dibahas sebagai berikut.

2.2.1 Sistem Perkerasan Cakar Ayam Sedyatmo

Sistem perkerasan cakar ayam merupakan pengembangan dari praktek fondasi cakar ayam Sedyatmo. Pada awalnya, fondasi cakar ayam ditemukan oleh Sedyatmo pada tahun 1961 untuk menjawab permasalahan bagi pembangunan menara listrik tegangan tinggi di atas tanah lunak rawa di daerah Ancol. Fondasi cakar ayam selanjutnya dikenal akan ciri khasnya yaitu mampu memberikan stabilitas struktur yang memuaskan pada semua bangunan di atas tanah lunak (Hardiyatmo & Suhendro, 2010). Lebih lanjut, fondasi cakar ayam temuan Sedyatmo kemudian dikembangkan dan diaplikasikan pada berbagai tipe bangunan sebagai berikut.

1. Fondasi untuk tangki
2. Fondasi menara transmisi tegangan tinggi
3. Fondasi untuk gudang, *high-rise building*, kolam renang, *power station*.
4. Perkerasan jalan
5. Perkerasan lapangan terbang.

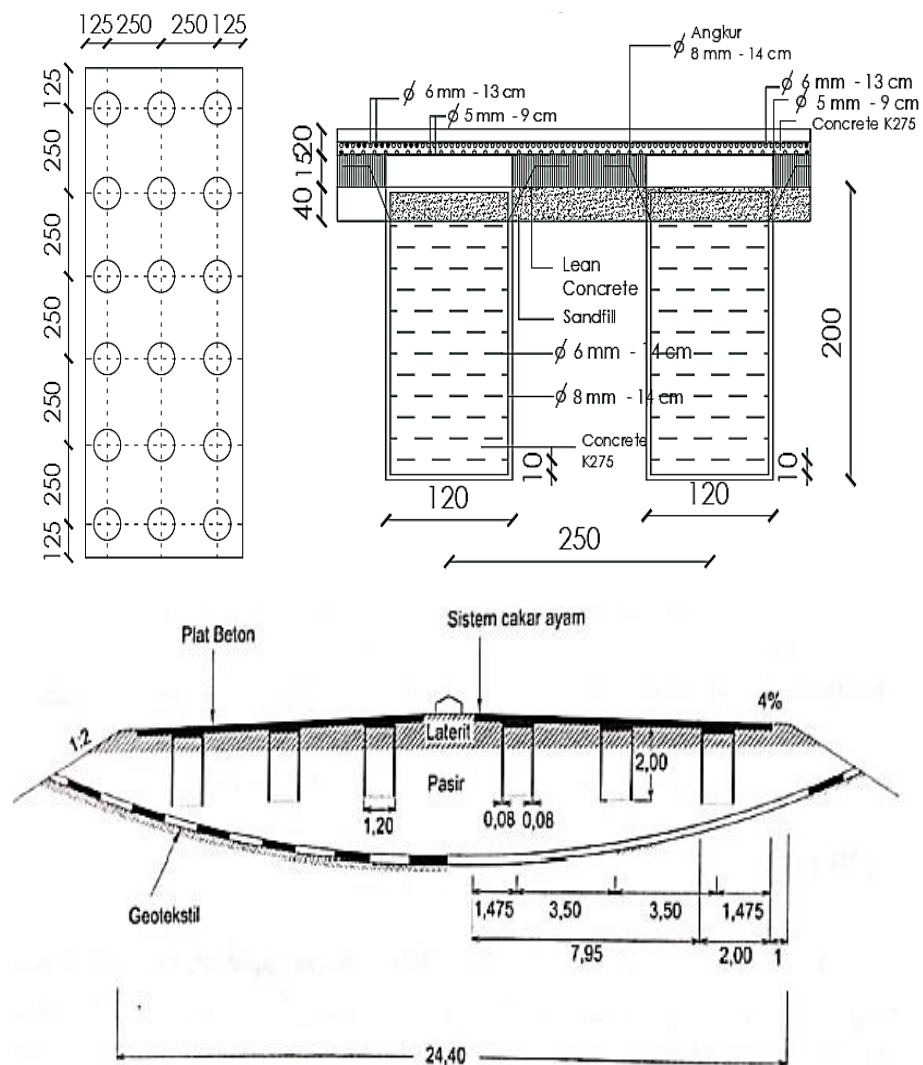
Komponen sistem perkerasan cakar ayam tersusun dari pelat beton bertulang tipis dengan rentang ketebalan 10-17 cm. Guna memperkaku pelat perkerasan, pipa-pipa beton bertulang dengan tebal cincin 8 cm, diameter 120 cm, dan panjang pipa berkisar antara 150 – 200 cm dipasang di bawah pelat. Pipa ini berperan sebagai “paku” yang menjaga kontak pelat dengan tanah. Sebagai “paku” pelat, pipa ini ditancapkan pada tanah lunak dengan jarak antar pipa kurang lebih 200 – 250 cm. Lantai kerja beton (*lean concrete*) mutu rendah dengan tebal 10 cm dipasang pada bagian bawah perkerasan yang berfungsi sebagai

lantai sementara pada saat konstruksi berlangsung. Sistem cakar ayam merupakan tipe perkerasan *Continuos Reinforced Concrete Pavement* (CRCP) sehingga diperlukan tulangan struktur dalam pelaksanaannya (Hardiyatmo & Suhendro, 2010).

Sistem cakar ayam sangat cocok digunakan sebagai perkerasan kaku (*rigid pavement*) untuk jalan raya dan bandara. Sistem cakar ayam lebih kuat dan tahan lama bila dibandingkan dengan perkerasan beton konvensional (Hardiyatmo, 2019b). Penggunaan perkerasan cakar ayam telah diterapkan pada beberapa bangunan berikut.

1. Sistem perkerasan cakar ayam diterapkan pada Jalan Tol Sedyatmo. Jalan ini merupakan akses menuju Bandara Soekarno Hatta Jakarta dan terletak pada timbunan setinggi 3,5 m. Selanjutnya, diterapkan pada ruas Jalan Tol Kampung Kayan – Sitiawan di Malaysia dan ruas Jalan Tol Simpang X – Taman Peringgit Jala di Malaka. Semuanya dibangun di atas tanah relatif lunak dan berfungsi baik selama lebih dari 25 tahun.
2. Sistem perkerasan cakar ayam telah diterapkan pada banyak bandara di Indonesia mulai dari Bandara Soekarno Hatta Jakarta, Pangkalan Udara Soewondo Medan (dulu Bandara Polonia), dan Bandara Juanda Surabaya. Sistem perkerasan pada bandara ini telah beroperasi selama 25 tahun dan telah terbukti berfungsi dengan baik tanpa mengalami kerusakan yang berarti.

Perhitungan sistem cakar ayam tidak pernah dipublikasikan oleh peneliti. Sistem ini dirancang pada intuisi yang cermat serta pengalaman yang matang dan divalidasi dengan penelitian skala penuh pada apron Bandara Juanda Surabaya, *runway* Pangkalan Udara Soewondo, dan *runway* Bandara Soekarno Hatta (Hardiyatmo & Suhendro, 2010). Model perkerasan fondasi cakar ayam untuk Jalan Tol Sedyatmo menuju Bandara Internasional Soekarno Hatta ditampilkan pada Gambar 2.4.



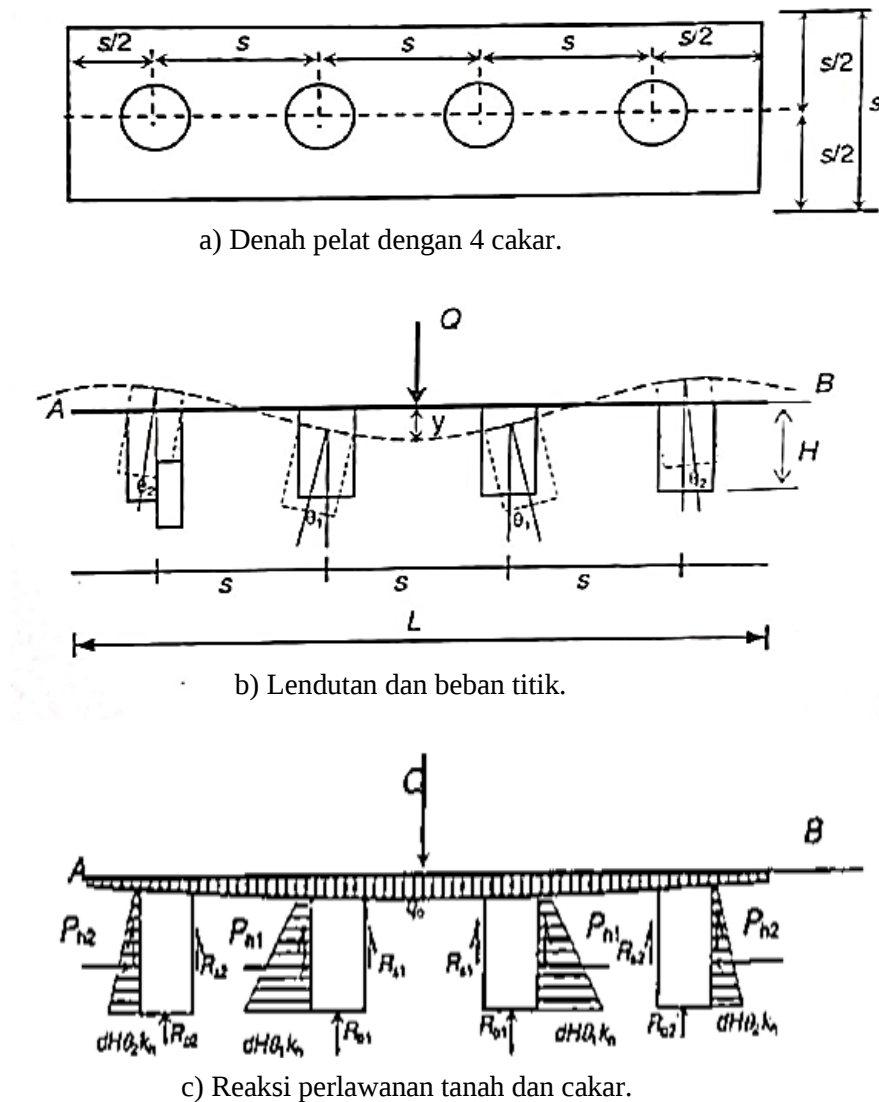
Gambar 2. 4 Model sistem perkerasan cakar ayam Sedyatmo (Hardiyatmo, 2019b).

Sistem perkerasan cakar ayam mampu mereduksi deformasi yang terjadi pada tanah dasar dengan dua cara. Pertama, sistem perkerasan cakar ayam mempertahankan kinerja perkerasan dengan cara menjamin kontak hubungan antara tanah dasar dan pelat tetap terjaga melalui pipa cakar pada pelat. Akibat beban kendaraan, berbagai bentuk deformasi pada perkerasan dapat terjadi yang mengarah pada kegagalan perkerasan. Salah satu fenomena yang paling umum terjadi pada perkerasan konvensional adalah terbentuknya rongga di antara pelat dan perkerasan saat beban bekerja. Rongga ini mengurangi kontribusi

dukungan tanah dasar ke pelat bila dibebani sehingga pelat tidak awet. Namun, cakar yang dipasang di bawah pelat memberikan efek “paku” sehingga seolah-olah pelat perkerasan seperti dipaku dengan tanah dan membuat perkerasan menjadi kaku serta tidak mudah bergerak. Dengan menjamin kontak antara pelat dan tanah, maka perkerasan menjadi lebih awet dan biaya pemeliharaan menjadi lebih kecil (Hardiyatmo, 2019b).

Kedua, sistem cakar ayam memanfaatkan tekanan lateral tanah pada sisi cakar sehingga pipa cakar yang monolit dengan pelat selalu dalam keadaan tegak ketika menerima pembebanan. Jika beban titik yang cukup besar dibebani di atas pelat, maka pelat cenderung akan melendut dan pipa cakar akan berotasi. Namun, tekanan tanah lateral di sekitar pipa cakar, tahanan ujung pipa cakar, dan gesekan antara pipa dan tanah akan memberikan reaksi perlawanan kepada pelat dan cakar untuk berdeformasi. Mekanisme ini memberikan kekakuan pada perkerasan sehingga perkerasan cenderung kaku dan tidak mudah dibengkokkan. Ilustrasi dari mekanisme ini dapat dilihat pada Gambar 2.5. Cakar yang paling dekat dengan beban akan menerima penderitaan paling besar serta membangkitkan perlawanan tekanan tanah lateral yang paling besar. Dalam sistem cakar ayam Sedyatmo, tahanan friksi lebih menentukan daripada tahanan ujung. Besar tahanan ujung pada cakar ayam Sedyatmo sangat kecil atau mungkin dapat diabaikan. Hal ini karena penampang cakar berlubang sehingga luasan penampang sangat kecil dibandingkan dengan bidang kontak selimut cakar pada tanah.

Hasil uji laboratorium menunjukkan bahwa lendutan pelat tanpa cakar lebih besar dibandingkan pelat dengan perkuatan cakar baik untuk beban statis maupun dinamis. Selain itu, hasil pengamatan menunjukkan untuk pelat dengan lebar retak dalam batas toleransi yang disyaratkan tidak merusak fungsi struktural cakar ayam (Hardiyatmo, 2019b).



Gambar 2. 5 Mekanisme perlawanan cakar (Hardiyatmo, 2019b).

2.2.2 Sistem Perkerasan Cakar Ayam Modifikasi (CAM)

Inovasi sistem cakar ayam modifikasi timbul sebagai pengembangan dan penyempurnaan dari inovasi cakar ayam yang dikembangkan oleh Sedyatmo. Sistem ini dikembangkan oleh Suhendro, Maryadi, dan Hardiyatmo. Pengembangan yang telah dilakukan didasarkan pada evaluasi hasil penelitian yang dilakukan secara intensif dan teliti oleh Tim Pengembangan Sistem Cakar Ayam Modifikasi sejak tahun 1990 (Hardiyatmo, 2014). Tipikal dari cakar ayam modifikasi ditampilkan

pada Gambar 2.6. Pada sistem cakar ayam modifikasi dilakukan beberapa modifikasi dari sistem cakar ayam Sedyatmo. Beberapa modifikasi yang dilakukan dari sistem cakar ayam yang kemudian menjadi pembaruan pada sistem cakar ayam modifikasi adalah sebagai berikut (Hardiyatmo & Suhendro, 2010).

1. Penggunaan pipa baja galvanisasi tahan karat dan gores.

Pipa beton cakar ayam yang semula berdiameter 120 cm dengan tebal 8 cm dan panjang 150 - 200 cm diganti dengan pipa baja berukuran diameter 80 cm, tebal 1,4 mm, dan panjang 120 cm. Modifikasi ini bertujuan untuk mereduksi berat struktur perkerasan sehingga lebih ringan yang berdampak pada penurunan tanah. Pengurangan berat pipa dari 1 tonf menjadi hanya 35 kgf sangat berarti pada tanah lunak karena tidak mengurangi daya dukung yang relatif kecil. Selain itu, dengan struktur yang lebih ringan maka tidak dibutuhkan alat-alat berat pada saat instalasi pipa. Lapisan lantai kerja juga tidak dibutuhkan karena tidak ada alat berat yang lewat saat konstruksi berlangsung. Konsekuensi dari modifikasi ini adalah diperlukan *detailing* khusus pada sambungan pipa baja dan pelat.

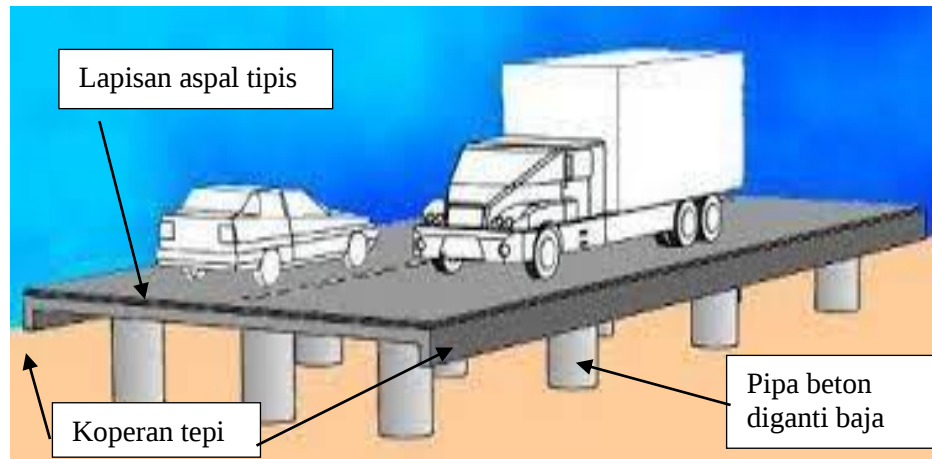
2. Sistem koperan ditambahkan pada sisi pelat.

Sistem koperan merujuk pada bentuk pelat siku penutup di tepi pelat yang monolit dan tertancap pada tanah lunak. Detail dapat dilihat pada Gambar 2.6 Sistem koperan ditujukan untuk menjaga tepian pelat menjadi lebih kuat dalam jangka panjang dan mencegah terbentuknya rongga dan retakan di tepi pelat akibat kendaraan yang sering keluar masuk dari/ke perkerasan. Sistem koperan juga ditambahkan untuk meminimalisasi pengaruh fluktuasi kadar air tanah di bawah pelat.

3. Penambahan lapisan aspal tipis di atas pelat.

Lapisan aspal berfungsi sebagai lapisan pelindung beton,

meningkatkan kenyamanan dalam berkendara dengan memberikan permukaan yang lebih rata dan lentur, serta menjaga pelat dari pengaruh beban suhu yang berulang khususnya pada daerah tropis. Lapisan aspal tipis dipasang di atas pelat dengan tebal 3 cm.



Gambar 2. 6 Model perkerasan cakar ayam modifikasi (Hardiyatmo & Suhendro, 2010)

Dengan mempertimbangkan kemajuan teknologi dan *advance engineering* yang telah berkembang, perancangan sistem perkerasan cakar ayam modifikasi dilakukan dengan metode *Nonlinear 3D Finite Element Method* dan *Soil Structure Interaction*. Pada metode matematik *3D Finite Element Method*, pelat dimodelkan sebagai piringan (*plate*) dan pipa cakar baja dimodelkan sebagai cangkang tiga dimensi (*3D shell*). Untuk mengetahui interaksi struktur dengan tanah (*soil structure interaction*), elemen pegas vertikal dipasang di bawah pelat dalam bentuk reaksi tanah dasar (*subgrade*). Interaksi tanah dalam bentuk kekakuan rotasi pipa cakar ayam dimodelkan sebagai elemen pegas horizontal (Hardiyatmo & Suhendro, 2010).

Dalam perancangannya, Suhendro melakukan berbagai variasi dimensi pipa, posisi beban, dan hasilnya dianalisis. Solusi pemodelan menghasilkan sebuah bentuk praktis untuk merancang perkerasan cakar ayam modifikasi dalam bentuk grafik *Suhendro Charts*. Grafik ini dapat

digunakan untuk berbagai kondisi *subgrade* (sangat lunak sampai sedang) dengan nilai *California Bearing Ratio* (CBR) = 0,25 – 10 atau nilai koefisien tanah *subgrade* vertikal $k_v = 0,25 - 6 \text{ kg/cm}^3$ dan berbagai tebal pelat (10 cm, 15 cm, 17 cm, dan 20 cm), variasi jarak/diameter/panjang pipa, serta posisi pembebanan. Tampilan *Suhendro Charts* ditampilkan pada Gambar 2.7 berikut.

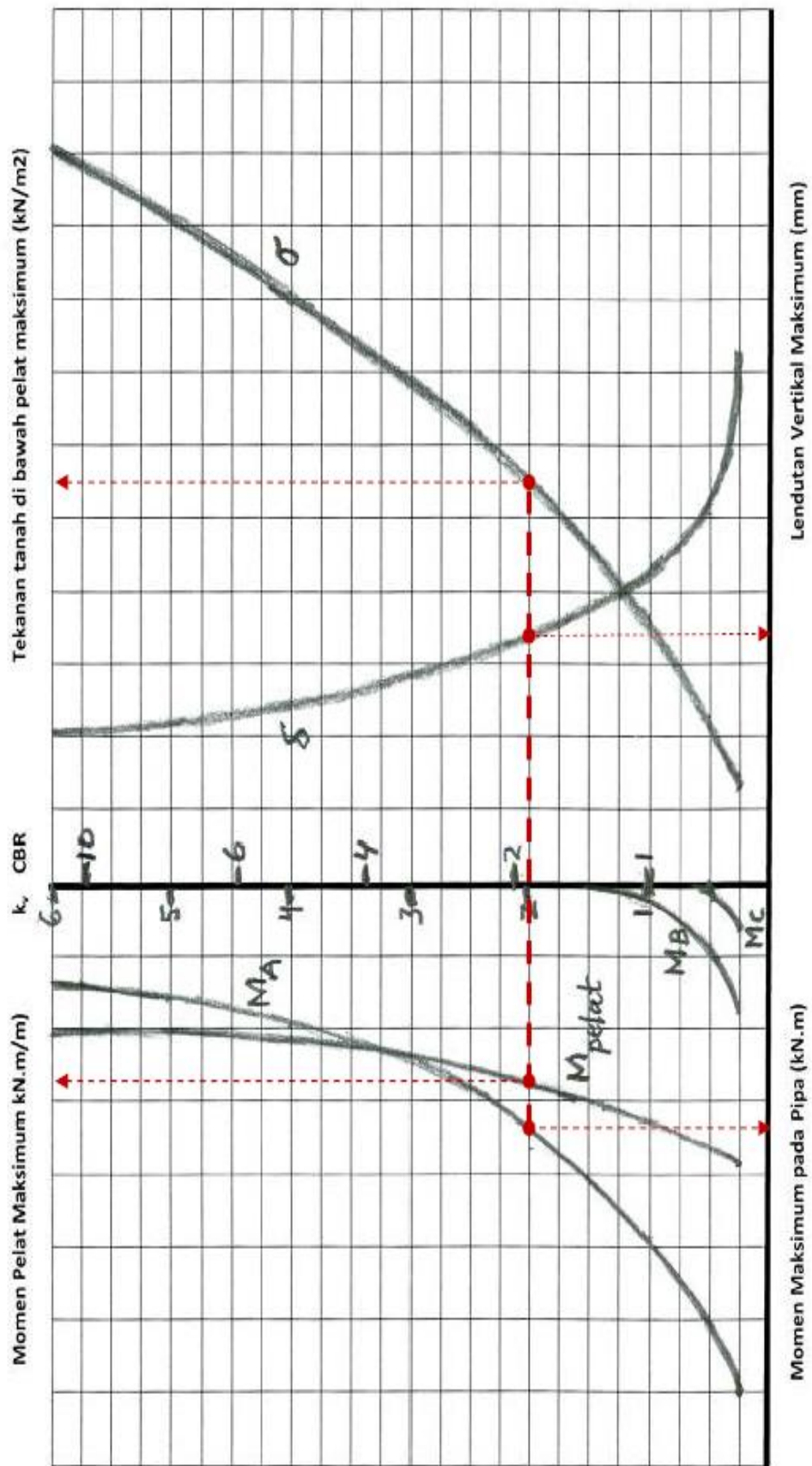
Suhendro Charts menyediakan hubungan antara beberapa parameter dalam satu grafik. Sumbu horizontal bawah yang mengarah ke kanan menyatakan lendutan vertikal maksimum yang terjadi pada pelat akibat beban (mm). Sumbu horizontal bawah yang mengarah ke kiri menunjukkan nilai momen maksimum pada pipa cakar berdasarkan posisi tinjauan pelat dari beban. Terdapat tiga tinjauan lokasi yaitu dari yang paling dekat dengan beban (M_A), sedikit lebih jauh (M_B), dan sangat jauh dari beban (M_C). Nilai ini dinyatakan dalam kN.m. Sumbu horizontal atas yang mengarah ke kiri menunjukkan momen pelat maksimum (kN.m/m) sedangkan sumbu horizontal atas yang mengarah ke kanan menunjukkan respon tekanan tanah maksimum di bawah pelat akibat beban (kN/m^2). Sumbu vertikal bagian kiri menunjukkan variasi nilai k_v tanah dan sumbu vertikal di sebelah kanan menunjukkan variasi nilai CBR. Terdapat korelasi antara nilai k_v dan nilai CBR.

Analisis lendutan pada perkerasan menggunakan metode *Beam on Elastic Foundation* (BoEF) untuk hitungan balok pada fondasi elastis (Hardiyatmo, 2014). Pada metode BoEF, beban di atas pelat menyebabkan pelat melendut dan memberikan momen pada cakar sehingga pipa akan berotasi membentuk rongga pada bagian bawah pelat. Jika hubungan pipa cakar dan pelat monolit, maka rotasi pusat cakar dianggap sama dengan rotasi pelat. Gerakan rotasi cakar menyebabkan tanah di sekeliling cakar memberikan perlawanan dengan membangkitkan tekanan tanah lateral. Besarnya tekanan tanah ini tergantung pada koefisien reaksi tanah dasar arah horizontal (k_h) dengan

asumsi tanah belum mengalami keruntuhan sehingga tidak menggunakan koefisien tekanan tanah pasif (k_p).

Untuk memvalidasi hasil pemodelan lewat 3D *Finite Element Method*, dilakukan pengujian pelat cakar ayam modifikasi, baik dalam skala penuh 1:1 di lokasi tanah lunak lempung maupun pengujian dalam skala laboratorium. Beberapa pengujian perkerasan cakar ayam modifikasi antara lain sebagai berikut.

1. Pengujian skala penuh 1:1 di tanah lempung lunak Waru-Surabaya yaitu di atas rencana lokasi Jalan Tol Waru – Juanda Surabaya. Hasil pengujian memberi hasil memuaskan untuk daya dukung dan defleksi pelat. Pengujian serupa juga dilakukan dalam skala laboratorium (Suhendro, 2005).
2. Uji beban skala penuh di *extension runway* Bandara Polonia, Medan (sekarang Pangkalan Udara Soewondo) untuk pembebanan sampai 80 ton terjadi lendutan sekitar 5 mm. Pengujian serupa juga dilakukan di apron Bandara Surabaya dan *runway* Bandara Soekarno Hatta Jakarta.
3. Uji coba skala tereduksi sistem cakar ayam di Laboratorium Mekanika Tanah Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada (UGM) memperlihatkan pengaruh tebal pelat, diameter, jarak, dan panjang cakar terhadap lendutan. Lewat pengujian ini diusulkan metode perancangan sistem cakar ayam dengan analisis lendutan BoEF yang ditambahkan dengan reaksi perlawanan momen cakar (Hardiyatmo, 2014).
4. Uji coba skala penuh di sepanjang ruas Jalan Pantura – Indramayu – Pemanukan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan (Puslitbang) Jalan dan Jembatan Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang (PUPR) Bandung menunjukkan bahwa kinerja cakar ayam modifikasi lebih baik daripada kinerja perkerasan konvensional. Hal ini ditunjukkan dengan besar lendutan pada cakar ayam modifikasi yang lebih kecil dari perkerasan konvensional.

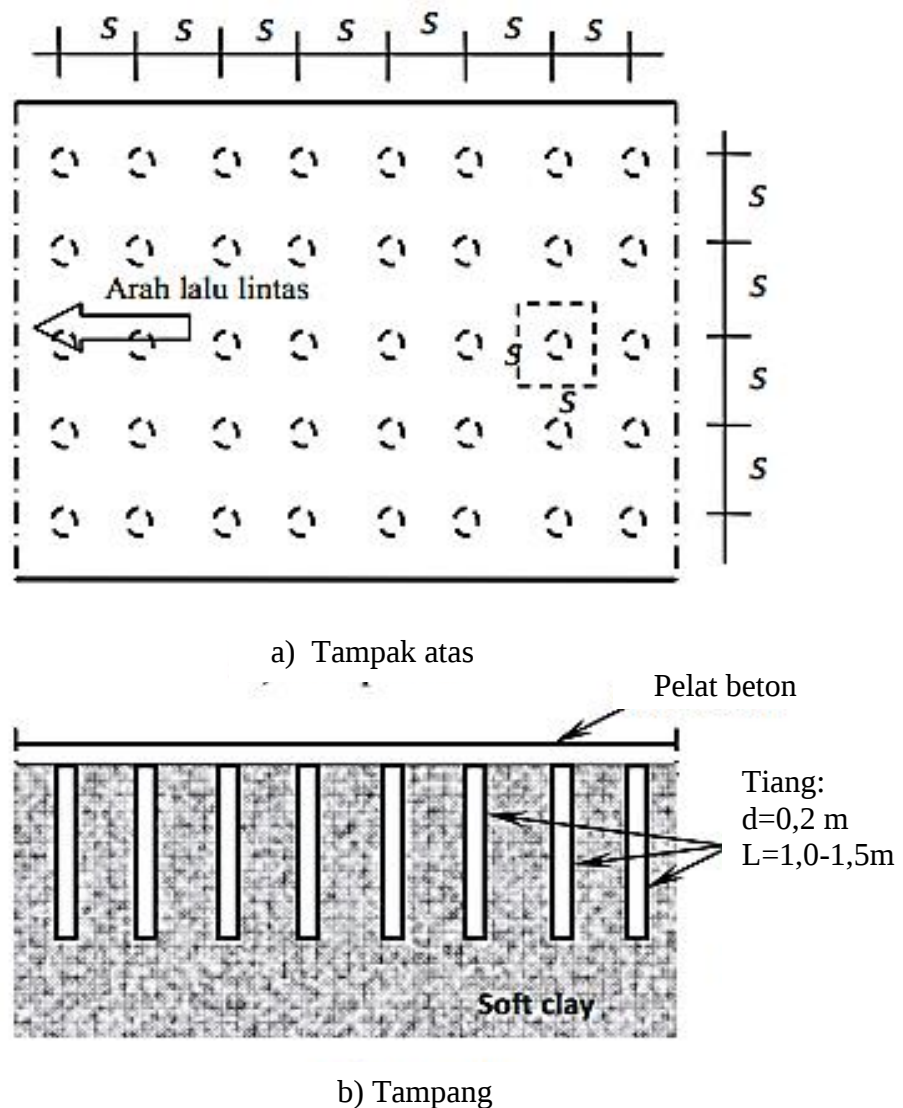


Gambar 2. 7 Suhendro Charts.

2.2.3 Sistem Perkerasan Pelat Terpaku

Sistem perkerasan pelat terpaku (*Nailed-Slab System*) merupakan model pengembangan dari sistem cakar ayam modifikasi. Sistem ini dikembangkan oleh Hardiyatmo sebagai model alternatif perkerasan pelat kaku di atas tanah lunak dan ekspansif. Secara umum, komponen sistem perkerasan pelat terpaku terdiri dari perkerasan beton bertulang dengan tebal antara 12-20 cm dan didukung oleh paku beton yang ramping dengan panjang 1,5-2 m dan diameter 0,15 – 0,20 m. Semua paku dihubungkan monolit dengan pelat oleh tulangan. Paku ramping ini berfungsi untuk menambah kuat dukung tanah dan mengurangi faktor kehilangan dukungan sehingga meningkatkan modulus reaksi *subgrade* vertikal efektif.

Sistem perkerasan pelat terpaku diharapkan berfungsi sebagai angkur pada beban rendah sekaligus berfungsi sebagai perlawanan lendutan pada beban berat serta memiliki kinerja yang sama dengan cakar ayam modifikasi (Hardiyatmo, 2008). Puri (2015) melakukan penelitian terhadap kinerja dan performa sistem perkerasan pelat terpaku dalam melawan pembebanan. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh bahwa model ini mampu meningkatkan kekakuan sistem dibandingkan dengan kekakuan pelat konvensional. Kekakuan ini terus bertambah seiring meningkatnya jumlah paku di bawah pelat. Selain itu, untuk pengujian beban sebesar 0 - 12 kN, diperoleh tidak terdapat jungkitan (*displacement* negatif) pada pelat. Hal ini menunjukkan fungsi paku sebagai angkur bekerja dengan baik. Tahanan friksi di sekitar paku mampu memberikan gaya perlawanan sehingga pelat tetap stabil. Penggunaan paku yang ramping berdampak pada penghematan penggunaan beton. Dengan kinerjanya yang menyerupai kinerja cakar ayam terdahulu, maka penggunaan pelat terpaku diharapkan mampu menghasilkan konstruksi perkerasan jalan yang efisien dan optimal. Tipikal pelat terpaku ditampilkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Model sistem perkerasan pelat terpaku (Hardiyatmo, 2008)

Keuntungan penggunaan sistem pelat terpaku menurut Hardiyatmo (2008) sebagai berikut.

1. Perkerasan memiliki tingkat kekakuan yang tinggi.
2. Sistem pelat memiliki kapabilitas untuk menyokong lalu lintas berat dan volume tinggi. Beban kendaraan maksimum atau melebihi beban gandar standar perkerasan umumnya dapat digunakan dalam desain.
3. Meskipun terjadi penurunan tidak seragam (*differential settlement*), umur perkerasan tetap terjaga lebih lama karena tiang menjaga kontak antara pelat dan beton perkerasan.

4. Komponen yang perlu dirawat selama masa pemeliharaan cenderung sedikit sehingga dapat menekan biaya pemeliharaan.
5. Sistem perkerasan pelat terpaku tidak memiliki sambungan perkerasan sehingga air tidak mungkin bisa masuk ke lapis fondasi bawah lewat retakan/sambungan. Hal ini juga mencegah terjadinya bahaya *pumping*, *spalling*, *faulting* pada beton perkerasan.
6. Biaya total selama masa layan lebih rendah dari perkerasan konvensional, meskipun biaya awal lebih tinggi.
7. Di bawah pelat tidak diperlukan agregat untuk lapis fondasi agregat. Hanya perlu lantai kerja dan sirtu.
8. Sistem perkerasan pelat terpaku dapat menjadi solusi untuk pembangunan perkerasan di atas tanah dasar lunak dan ekspansif.
9. Paku-paku beton dapat diperpanjang sampai mencapai tanah yang lebih kuat sehingga dapat berfungsi dalam mempertinggi kapasitas dukung.

2.3 Perkerasan Kaku dan Perilakunya

Lapis perkerasan jalan merupakan lapisan perantara yang berfungsi untuk menyalurkan beban lalu lintas ke tanah dasar. Perkerasan jalan direncanakan dengan ketebalan, kekuatan, dan stabilitas tertentu. Tujuannya adalah untuk memberikan pelayanan yang baik kepada pengguna transportasi dan diharapkan dapat bertahan tanpa kerusakan yang signifikan selama jangka waktu penggunaannya. (Hardiyatmo, 2019b). Pada umumnya, jarang terdapat tanah dasar yang cukup kuat menahan beban lalu lintas tanpa perkerasan. Oleh karena itu, perkerasan selalu dibutuhkan pada konstruksi jalan.

Perkerasan berfungsi untuk melindungi tanah dasar agar tidak mengalami deformasi yang berlebihan akibat beban lalu lintas. Lapisan perkerasan akan mendistribusikan beban roda kendaraan yang awalnya bekerja secara terpusat menjadi terdistribusi merata. Akibatnya, tegangan regangan maksimum yang terjadi pada tanah dasar dapat direduksi.

Secara umum fungsi perkerasan dijelaskan sebagai berikut.

1. Menciptakan suatu struktur yang kuat dalam menyokong beban arus lalu lintas.
2. Mendistribusikan beban roda secara merata ke tanah dasar sehingga tanah dasar tidak cepat rusak akibat penderitaan yang berlebihan dari kendaraan.
3. Memberikan tahanan gelincir (*skid resistance*) pada jalan sehingga dapat meningkatkan keselamatan pengendara dari bahaya tergelincir.

Dalam aspek geoteknik, perancangan konstruksi perkerasan jalan lebih berfokus kepada beberapa hal berikut.

1. Proses stabilisasi tanah dasar untuk mengembalikan kemampuan awal tanah dasar dalam menyokong beban.
2. Pemilihan material lolos air dari lapis fondasi dan fondasi bawah.
3. Pembangunan drainase yang baik.

Lapis perkerasan kaku (*rigid pavement*) merupakan struktur perkerasan yang tersusun atas pelat panel beton yang tidak menerus (bersambung) tanpa/dengan tulangan, atau menerus dengan tulangan (Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah Pd.T-14-2003). Perkerasan kaku termasuk salah satu dari ketiga jenis perkerasan yang umum digunakan selain perkerasan lentur (*flexible pavement*) dan perkerasan komposit (*composite pavement*). Pada lapis perkerasan kaku, beton akan dibuat ke dalam sebuah pelat panel tertentu dengan ketebalan dan ukuran yang telah direncanakan lalu disambung menjadi satu kesatuan.

Perkerasan kaku mengandalkan kekakuan pelat beton yang dicor untuk mereduksi tegangan regangan yang terjadi pada tanah dasar akibat beban kendaraan. Namun, kekakuan pelat bukan menjadi satu-satunya hal yang diandalkan perkerasan kaku dalam melawan pembebanan. . Untuk menambah kekuatan dari pelat, lapis fondasi bawah (*subbase course*) diberikan di antara tanah dasar dan pelat perkerasan. (Hardiyatmo, 2019b). Lapis fondasi bawah

berfungsi untuk menambah ketebalan lapisan perkerasan dengan lebih murah (dibandingkan dengan penggunaan beton pada seluruh ketebalan lapisan). Lapis fondasi bawah dapat tidak digunakan jika kemampuan tanah dasar cukup untuk menyokong beban yang bekerja. Lapis fondasi bawah perlu dipasang jika nilai *California Bearing Ratio* (CBR) tanah dasar $< 2\%$. Komponen lapis perkerasan kaku menurut FHWA (2006) dijelaskan pada Gambar 2.9 sebagai berikut.



Gambar 2. 9 Komponen lapis perkerasan kaku.

Beberapa karakteristik umum dari perkerasan kaku dirangkum dalam Tabel 2.1 berikut.

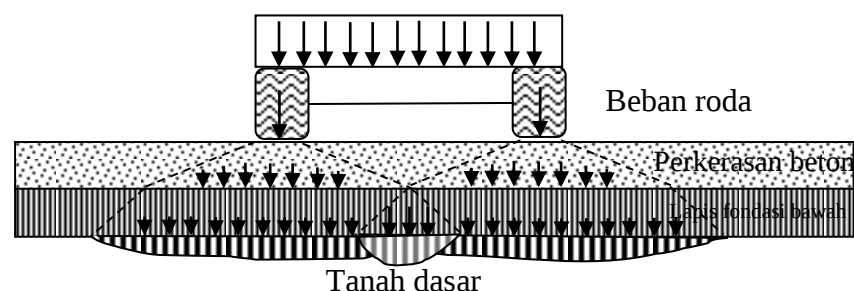
Tabel 2. 1 Karakteristik Umum Perkerasan Kaku

Karakteristik	Perkerasan kaku
Komponen lapis perkerasan	Lapis perkerasan terdiri dari pelat beton kaku yang terletak di atas tanah dasar dan/tanpa lapis fondasi bawah (<i>subbase</i>).
Penggunaan	Dominan pada jalan kelas tinggi dengan <i>traffic</i> padat.
Distribusi beban	Penyebaran lebih baik/lebih merata.
Kekuatan perkerasan	Kekuatan perkerasan terletak pada pelat beton.
Ketahanan terhadap air	Lebih tahan terhadap air.
Tipikal konstruksi	Dibuat dalam panel-panel pelat berukuran tertentu yang disambung.

Perancangan dalam perkerasan kaku perlu memperhatikan beberapa sifat fisik dan mekanis dari perkerasan kaku. Hal ini diperlukan untuk mengetahui perilaku dari perkerasan kaku selama masa layan. Beberapa perilaku penting dari perkerasan kaku saat menerima pembebanan akan dijelaskan sebagai berikut.

2.3.1 Distribusi Beban Roda ke Tanah Dasar

Ketika beban roda kendaraan berjalan di atas pelat perkerasan beton, roda kendaraan memberikan beban merata seluas area kontak ban pada pelat. Beban yang diterima oleh ban kendaraan merupakan berat sendiri kendaraan dan muatannya yang disalurkan melalui sumbu kendaraan. Luasan area kontak ban cenderung kecil sehingga beban dapat dianggap sebagai beban terpusat. Bidang kontak yang kecil menyebabkan tegangan terbesar pada lapis perkerasan terkonsentrasi pada permukaan perkerasan. Selanjutnya, tegangan ini akan didistribusikan ke tanah dasar lewat perkerasan beton dan lapis fondasi bawah. Kekakuan pelat beton yang cukup tinggi membuat distribusi beban lalu lintas menjadi lebih merata. Beban lalu lintas disebarkan ke area tanah dasar yang lebih luas. Oleh karena itu, kekuatan struktur perkerasan beton terletak pada kekuatan betonnya. Semakin ke bawah, distribusi beban akan semakin luas dan tegangan akan tereduksi. Akibatnya, tegangan dan deformasi total yang terjadi pada tanah dasar akan berkurang (Hardiyatmo, 2019b). Ilustrasi penyebaran beban roda pada tanah dasar dijelaskan pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 10 Distribusi beban roda pada perkerasan kaku.

Ilustrasi di atas mengisyaratkan kepada perencana bahwa kualitas tanah dasar juga sangat perlu diperhatikan dalam perancangan perkerasan kaku.. Kajian tentang tanah dasar akan dijelaskan pada subbab berikutnya.

2.3.2 Pengaruh Lingkungan dan Beban Lalu Lintas

Kondisi lingkungan dan pembebanan lalu lintas berpengaruh pada karakteristik dan perilaku perkerasan kaku sebagai berikut.

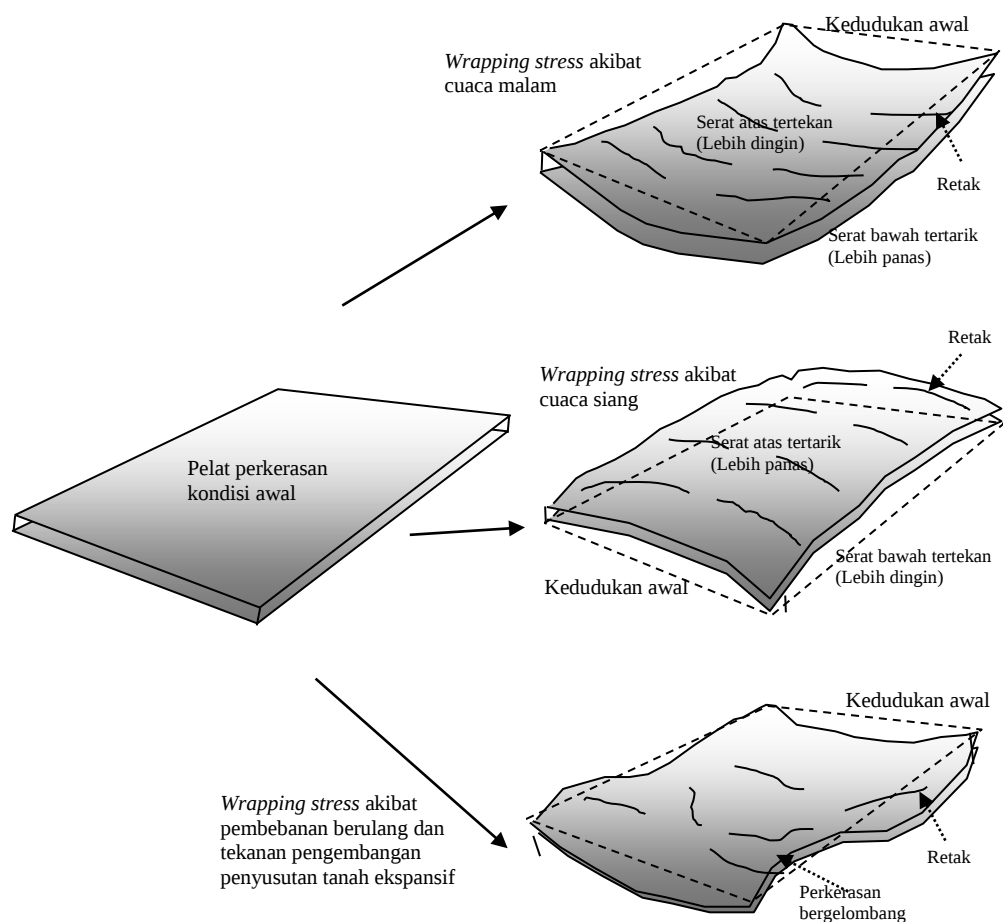
1. Tegangan Lengkung (*Wrapping Stress*)

Pengaruh lingkungan yang paling berdampak pada kinerja perkerasan beton adalah pengaruh suhu. Perbedaan suhu yang terjadi antara serat atas dan serat bawah memicu proses pemuaian dan penyusutan pada pelat. Ketika suhu serat atas lebih tinggi dari suhu serat bawah, perkerasan akan mencembung. Sebaliknya, ketika suhu serat atas lebih rendah dari suhu serat bawah, perkerasan akan berubah menjadi cekung. Peristiwa ini dapat disebut juga sebagai kembang susut pada pelat. (Niken et al., 2020). Ketika gerakan ini terjadi, berat sendiri pelat akan berusaha mempertahankan kedudukan awal perkerasan dan terjadi tegangan lengkung (*wrapping stress*) yang menimbulkan retakan (Hardiyatmo, 2019b). Hal ini mengganggu proses penyaluran beban pada lokasi retak.

Tegangan lengkung juga dapat terjadi akibat pembebanan yang berulang pada permukaan jalan. Besarnya tegangan tergantung pada posisi pembebanan di atas perkerasan. Selain itu, tegangan lengkung juga dapat terjadi akibat tanah dasar yang berperilaku ekspansif. Perilaku ekspansif merujuk pada perilaku tanah yang mudah mengalami perubahan volume secara signifikan akibat sering mengalami pengembangan dan penyusutan. Beberapa jenis tanah lempung dengan kandungan mineral yang tinggi mudah mengalami perubahan volume yang signifikan ketika kadar air

berubah. Pengurangan kadar air menyebabkan tanah menyusut dan penambahan kadar air menyebabkan tanah mengembang.

Perubahan bentuk permukaan tanah akibat adanya kembang susut tanah mengakibatkan timbulnya tegangan lentur pada perkerasan yang menghasilkan permukaan yang tidak merata pada perkerasan. Tekanan pengembangan yang dihasilkan juga dapat menimbulkan kerusakan serius pada perkerasan jalan di atasnya. Perkerasan akan melengkung cembung-cekung secara silih berganti akibat adanya perubahan volume tanah yang signifikan dan cepat sehingga perkerasan menjadi retak-retak. Ilustrasi terbentuknya tegangan lengkung digambarkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2. 11 *Wrapping stress* akibat cuaca dan pembebanan berulang.

2. Kelelahan (*Fatigue*)

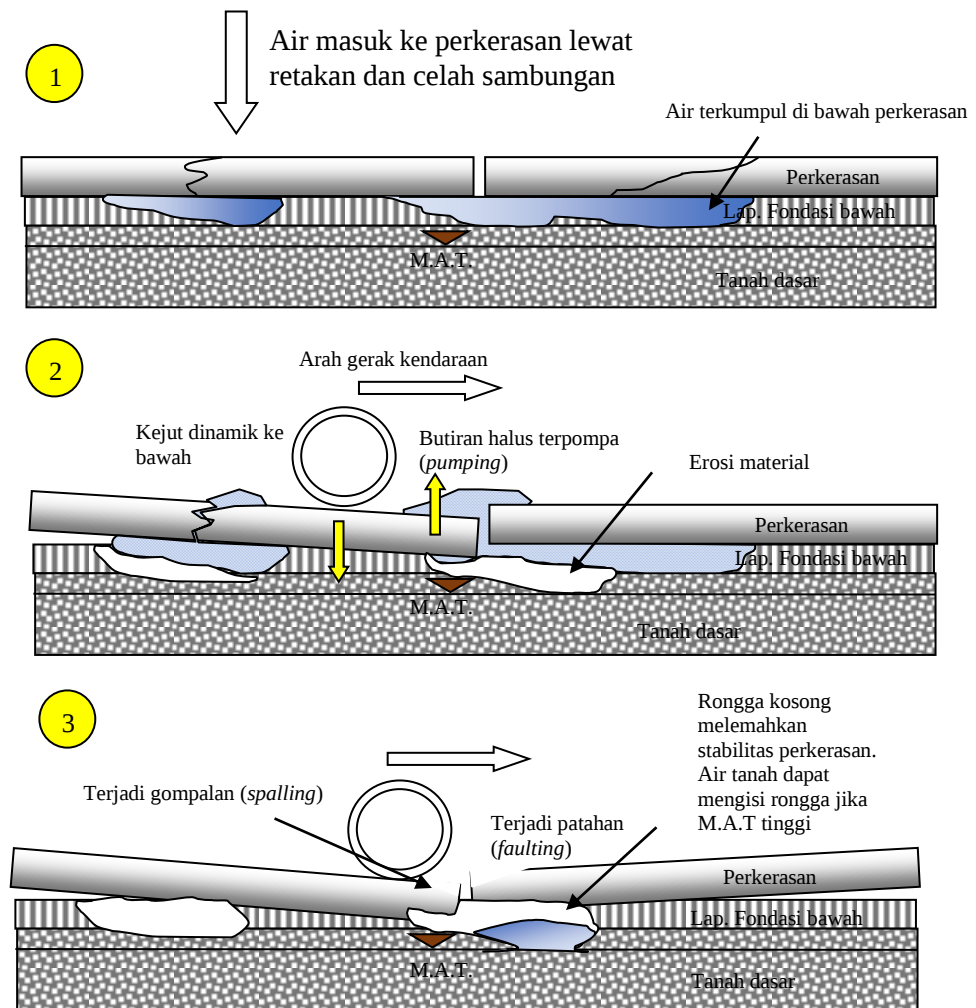
Pembebanan berulang (siklik) yang terjadi pada perkerasan dapat memicu kegagalan akibat patah lelah (*fatigue*) pada perkerasan jalan. Pada pembebanan berulang, terjadi akumulasi tegangan secara berkelanjutan yang menimbulkan jalur retak pada perkerasan dan menurunkan kinerja perkerasan. Retakan yang terjadi pada pelat dan menimbulkan

2.3.3 *Pumping, Faulting, dan Spalling*

Retakan-retakan dan sambungan yang longgar pada perkerasan kaku memberikan jalur bagi air untuk masuk dan mengangkat material-material butiran halus yang mudah tererosi di bawah pelat untuk naik ke atas pelat. Ketika air masuk ke dalam celah retakan/sambungan, maka akan terbentuk genangan air di bawah pelat. Saat terjadi kejutan dinamik akibat beban kendaraan, air bersama butiran halus akan terpompa (*pumping*) ke permukaan. Alhasil, terbentuk rongga di bawah pelat yang melemahkan kontak tanah dengan pelat (Khoury et al., 2022). Rongga ini mengakibatkan pelat bergerak turun untuk mengisi rongga dan terjadi penurunan tidak seragam (*differential settlement*) pada pelat.

Jika muka air tanah dasar cukup tinggi, maka air dapat mengisi rongga tersebut dan dalam kasus ekstrem dapat menimbulkan gaya angkat (*uplift*) pada pelat (Hardiyatmo, 2019b). Peristiwa ini mengakibatkan permukaan perkerasan bergelombang dan menimbulkan terjadinya patahan (*faulting*) di beberapa bagian perkerasan. Bila terus digunakan, patahan ini dapat menjalar dan memicu terjadinya keropos atau pengelupasan (*spalling*) pada beton (Sabilirrahman & Mudiyo, 2019). Salah satu alasan utama dalam inovasi penggunaan pipa-pipa beton atau baja pada sistem perkerasan cakar ayam Sedyatmo dan sistem cakar ayam modifikasi serta penggunaan paku-paku kurus pada

sistem pelat terpaku adalah untuk menjamin kontak pelat dan tanah tetap terjaga sehingga peristiwa *pumping*, *faulting*, dan *spalling* yang menurunkan kinerja pelat dapat diminimalisir (Hardiyatmo & Suhendro, 2010). Mekanisme ini diilustrasikan pada Gambar 2.12 berikut.



Gambar 2. 12 Proses terjadinya *pumping*, *spalling*, dan *faulting*.

2.3.4 Pengaruh Air pada Kegagalan Perkerasan

Air dapat berakibat buruk pada kinerja perkerasan. Air yang masuk lewat celah retakan/sambungan pada perkerasan akan terkumpul dan mengendap di antara perkerasan dan tanah dasar. Akibatnya, terjadi

penurunan kualitas tanah dasar yang berdampak pada kegagalan perkerasan. Beberapa kegagalan perkerasan yang mungkin terjadi akibat air sebagai berikut (Shahin & Putra, 2019).

1. Penggenangan air di antara perkerasan dan tanah dasar menimbulkan terjadinya pelemahan kontak tanah dasar dan perkerasan sehingga perkerasan mudah bergerak dan berdeformasi.
2. Pada tanah dasar yang ekspansif dan muka air tanah cukup tinggi, tekanan pengembangan dari tanah dasar akibat kenaikan kadar air dari luar dapat menimbulkan cembungan (*wrapping stress*) pada perkerasan dan menimbulkan retak
3. Jika material tanah dasar buruk dan memiliki erodibilitas tinggi, tanah dasar dan lapis fondasi bawah dapat terkikis (*erotion*) dan terpompa ke permukaan (*pumping*) sehingga menimbulkan rongga yang melemahkan kontak pelat dan tanah dasar.
4. Air menurunkan kapasitas dukung tanah dasar dalam menahan beban lalu lintas.
5. Dalam kondisi ekstrem, kumpulan air yang berada di bawah pelat perkerasan dapat mendorong pelat terangkat ke atas akibat tekanan hidrostatik air dan mengakibatkan hilangnya kontak pelat dan tanah.

2.4 Tanah dan Klasifikasinya

Tanah merupakan material lapisan bumi yang berasal dari material batuan induk utama yang telah mengalami proses pelapukan fisik, kimiawi, atau biologis, yang kemudian terurai menjadi butiran yang lebih halus dan terangkat ke permukaan (Notohadiprawiro, 1999). Dalam pandangan teknik sipil secara umum, tanah merupakan material lapisan bumi yang tersusun dari agregat, mineral padat yang tidak terikat secara kimia (tersementasi), dan bahan-bahan organik yang telah melalui proses pelapukan disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi rongga di antara partikel butiran tanah (Das, 1995). Umumnya, pelapukan akibat proses kimia dapat terjadi akibat faktor oksigen, karbondioksida, air, dan proses kimia yang lain. Jika hasil pelapukan tetap

berada di lokasi asalnya, tanah ini disebut *residual soil*. Jika hasil pelapukan berpindah tempat dari lokasi asalnya, tanah ini disebut *transported soil* (Hardiyatmo, 2019a).

Tanah suatu lokasi tentunya memiliki sifat dan karakteristik yang berbeda-beda dengan lokasi lainnya. Dalam kaitannya dengan proses pembangunan dalam teknik sipil, karakteristik dan perilaku tanah yang dianalisis bertujuan untuk mengetahui kapasitas dukung tanah tersebut. Sampai saat ini, terdapat banyak jenis tanah yang telah diketahui. Namun, dalam teknik sipil istilah tanah pasir, lempung, lanau, dan lumpur merupakan yang paling populer digunakan. Istilah ini digunakan untuk membedakan ukuran butiran tanah dan sifat tanah secara khusus. Dalam ilmu mekanika tanah, terdapat beberapa metode yang sering digunakan dalam melakukan klasifikasi tanah. Beberapa metode tersebut dijelaskan sebagai berikut.

1. *American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO)*

Sistem klasifikasi AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Official*) lebih banyak digunakan dalam menentukan kualitas tanah dasar dalam perancangan jalan, lapis fondasi bawah, dan lapis fondasi atas. Klasifikasi AASHTO membagi tanah ke dalam delapan kelompok yaitu A-1 sampai A-8 termasuk sub-sub kelompoknya (Hardiyatmo, 2019a). Indeks kelompok (GI) diberikan pada setiap kelompok tanah untuk mengevaluasi lebih lanjut tanah-tanah dalam kelompoknya. Alur prosedur klasifikasi tanah menurut AASHTO dijelaskan pada Tabel 2.2 berikut. Secara singkat, prosedur penentuan klasifikasi tanah menurut AASHTO dijelaskan sebagai berikut.

- a. Tentukan persentase lolos saringan tanah contoh terhadap saringan No.200.
- b. Tentukan persentase lolos saringan tanah contoh terhadap saringan No.10, No.40, dan No.200.
- c. Tentukan nilai LL (batas cair) dan nilai PI (indeks plastisitas) tanah lolos saringan No.40 dan indeks kelompok tanah (GI).

Tabel 2. 2 Klasifikasi Tanah AASHTO

Klasifikasi Umum			Material Granuler (< 35% lolos saringan No.200)					Tanah lanau-lempung (<35% lolos saringan No.200)			
Klasifikasi kelompok	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Klasifikasi kelompok	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5/A-7-6
Analisis Saringan (% lolos)											
2 mm (no.10)	50 maks	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,425 mm (no.40)	30 maks	50 maks	51 min	-	-	-	-	-	-	-	-
0,075 mm (no.200)	15 maks	25 maks	10 maks	35 maks	35 maks	35 maks	35 maks	36 min	36 min	36 min	36 min
Sifat fraksi lolos saringan no.40											
Batas cair (LL)	-	-	-	40 maks	41 min	40 maks	41 min	40 maks	41 min	40 maks	41 min
Indeks plastis (PI)	6 maks	6 maks	NP	10 maks	10 maks	11 min	11 min	10 maks	10 maks	11 min	11 min
Indeks kelompok (GI)	0	0		0		4 maks		8 maks	12 maks	16 maks	20 maks
Tipe material pokok pada umumnya	Pecahan batu, kerikil, dan pasir		Pasir halus	Kerikil berlanau atau berlempung dan pasir				Tanah berlanau		Tanah berlempung	
Penilaian umum sebagai tanah dasar	Sangat baik sampai baik							Sedang sampai buruk			

(Sumber: Hardiyatmo, 2019a)

2. *Unified Soil Classification System (USCS)*

Sistem klasifikasi tanah USCS (*Unified Soil Classification System*) adalah sistem klasifikasi tanah yang umum digunakan dalam geoteknik. Sistem ini mengelompokkan tanah dalam dua kelompok besar yaitu tanah berbutir kasar atau yang disebut sebagai *coarsed grained soil* dan tanah berbutir halus yang disebut sebagai *fine grained soil*. Detail karakteristik tiap kelompok tanah dijelaskan sebagai berikut (Hardiyatmo, 2019a).

- a. Tanah berbutir kasar (*coarse-grained soil*), merupakan tanah kerikil dan pasir dengan jumlah sebesar kurang dari 50% berat total contoh tanah lolos saringan No.200. Tanah yang berkerikil diberi simbol G (*gravel*) sedangkan tanah yang berpasir diberi simbol S (*sand*).
- b. Tanah berbutir halus (*fine-grained soil*), yaitu tanah dengan jumlah sebesar lebih dari 50% berat total contoh tanahnya lolos dari saringan No.200. Tanah lempung anorganik diberi simbol C (*clay*) sedangkan tanah lanau anorganik diberi simbol M (*silt*). Tanah lanau dan lempung organik diberi simbol O (*organic silt or clay*). Khusus tanah gambut atau tanah dengan kandungan zat organik tinggi diberi simbol Pt (*peat and highly organic soil*).

Untuk tanah dengan gradasi baik (*well-graded*) disimbolkan dengan W, sedangkan tanah dengan gradasi buruk (*poor-graded*) disimbolkan dengan P. Tanah dengan plastisitas tinggi disimbolkan sebagai H (*high-plasticity*) dan plastisitas rendah disimbolkan sebagai L (*low-plasticity*).

Alur prosedur klasifikasi tanah menurut USCS dijelaskan pada Tabel 2.3 berikut. Secara singkat, prosedur penentuan klasifikasi tanah menurut USCS dijelaskan sebagai berikut.

- a. Tentukan persentase lolos saringan tanah contoh dengan saringan No.200.
- b. Jika tanah berbutir kasar, tentukan persentase lolos saringan No.4 untuk menentukan apakah tanah termasuk dalam pasir atau kerikil. Kemudian tentukan nilai C_u (koefisien keseragaman), C_c (koefisien

gradasi), atau nilai PI (indeks plastisitas) sesuai dengan parameter yang dibutuhkan dalam pengambilan keputusan jenis tanah menurut Tabel 2.3.

- c. Jika tanah berbutir halus, tentukan nilai LL (batas cair) tanah serta nilai PI (indeks plastisitas) tanah sesuai dengan parameter yang dibutuhkan dalam Tabel 2.3. Nilai PI dan LL sampel tanah selanjutnya akan diplot ke dalam grafik yang tertera di dalam Tabel 2.3. Pengambilan keputusan jenis tanah ditentukan berdasarkan posisi plot sampel tanah pada garis A. Jika tanah dengan kadar organik tinggi, dapat disimpulkan bahwa tanah merupakan tanah gambut dan diidentifikasi sesuai ASTM D-2488.

2.5 Tanah Lunak

Tanah lunak didefinisikan sebagai tanah yang mayoritas tersusun dari butiran tanah yang sangat kecil seperti lempung dan lanau serta bersifat kohesif dengan karakteristik gaya geser yang rendah, daya permeabilitas yang rendah, kompresibilitas tinggi, dan mempunyai daya dukung rendah (Siska & Yakin, 2016). Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Indonesia (ESDM, 2019) tanah lunak merupakan tanah yang umumnya tersusun dari lempung Holosen berumur < 10.000 tahun yang secara alamiah terbentuk melalui proses pengendapan pada dataran alluvial pantai, rawa, danau, dan sungai.

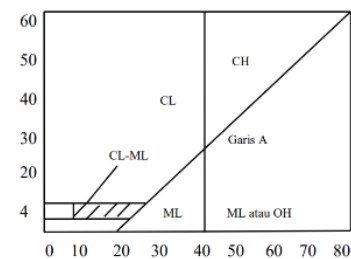
Menurut pandangan teknik sipil, tanah lunak didefinisikan sebagai tanah yang dapat menyebabkan masalah ketidakstabilan dan penurunan jangka panjang dan tidak dapat ditoleransi apabila tidak dipelajari dan diselidiki secara seksama. Tanah ini hampir selalu mempunyai kuat geser yang rendah dan kompresibilitas tinggi (Panduan Geoteknik 1, 2002). Parameter umum yang menunjukkan bahwa tanah tersebut merupakan tanah lunak adalah sebagai berikut (Das, 1995).

1. Batas cair tinggi ($LL \geq 50\%$)

Tabel 2. 3 Klasifikasi Tanah USCS

Divisi Utama	Simbol	Nama jenis	Kriteria laboratorium
Tanah berbutir kasar 50% atau lebih tertahan saringan no.200 (0,075 mm)	Kerikil bersih (sedikit butiran halus)	GW	Kerikil gradasi baik dan campuran pasir kerikil, sedikit/tidak mengandung butiran halus.
		GP	Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir-kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus.
		GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil-pasir lempung
	Kerikil banyak kandungan butiran halus	GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil-pasir lempung
	Pasir lebih dari 50% fraksi kasar lolos saringan no.4 (4,75 mm)	SW	Pasir gradasi baik, pasir kerikil,, sedikit atau tidak mengandung lumpur.
		SP	Pasir gradasi buruk, pasir kerikil,, sedikit atau tidak mengandung lumpur.
		SM	Pasir berlanau, campuran pasir-lanau
		SC	Pasir berlempung, campuran pasir-lempung
Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos saringan no.200 (0,075 mm)	Lanau dan lempung dengan LL 50% atau kurang	ML	Lanau tak organik dan pasir sangat halus, serbuk batuan atau pasir halus berlanau atau berlempung
		CL	Lempung tak organik plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung kurus (<i>lean clays</i>)
		OL	Lanau organik dan lempung berlanau organik plastisitas rendah
	Lanau dan lempung dengan LL > 50%	MH	Lanau tak organik atau pasir halus diatomae, atau lanau diatom, lanau elastis
		CH	Lempung tak organik plastisitas tinggi, lempung gemuk (<i>fat clays</i>)
		OH	Lempung organik plastisitas sedang sampai tinggi
	Tanah dengan kadar organik tinggi	Pt	Gambut dan tanah lain dengan kandungan organik tinggi

Klasifikasi berdasarkan persentase butiran halus, <5% lolos saringan no.200 : GW, GP, SW, SP. Lebih dari 12% lolos saringan no.200 : GM, GC, SM, SC. 5% - 12% batasan klasifikasi yang mempunyai simbol double.



2. Koefisien permeabilitas sangat rendah ($k \leq 10^{-7}$ cm/detik)
3. Angka pori (e) dalam rentang 2,5 – 3,2
4. Tanah jenuh air dengan kadar air antara 90 – 120%
5. Berat jenis (Gs) berada dalam rentang 2,6 – 2,9

Tanah lunak seringkali menjadi kendala dan tantangan geoteknik dalam proses pembangunan konstruksi sipil. Daya dukung tanah lunak yang rendah mengakibatkan bahaya penurunan (*settlement*) semakin tinggi. Penurunan membuat bangunan di atasnya kehilangan stabilitas dan menurunkan kinerja layan struktur. Para ahli geoteknik berusaha untuk mempelajari karakteristik dan perilaku dari tanah lunak sehingga dapat mengantisipasi risiko yang ditimbulkan dari tanah lunak dan memilih perkuatan yang tepat.

2.5.1 Klasifikasi Tanah Lunak

Sistem klasifikasi USCS, AASHTO, dan USDA tidak membahas secara spesifik terkait konsistensi dan kekerasan tanah di dalam setiap kelompok tanah yang diatur. Oleh karena itu, Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah melalui Panduan Geoteknik 1 (2002) melakukan klasifikasi tanah lunak menjadi dua kategori yaitu tanah lempung lunak dan tanah gambut. Tanah lempung lunak memiliki kandungan mineral dan kadar air tinggi dan menyebabkan kuat geser yang rendah. Indikasi keberadaan lempung lunak di lapangan dapat diidentifikasi dengan beberapa petunjuk seperti pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Petunjuk Identifikasi Tanah Lempung Lunak di Lapangan

Konsistensi	Indikasi Lapangan
Sangat lunak	Jika diremas dalam kepalan tangan, tanah akan keluar di antara jari-jari tangan.
Lunak	Tidak sulit dibentuk dengan jari tangan

Tanah gambut merupakan tanah dengan kandungan zat organik tinggi. Berdasarkan kandungan organiknya, tanah gambut dibedakan lagi menjadi tiga jenis yaitu tanah gambut, tanah organik, dan tanah dengan kadar organik rendah sebagaimana diatur dalam Tabel 2.5

Tabel 2. 5 Klasifikasi Tanah Lunak Berdasarkan Kadar Organik

Kadar organik	Kelompok tanah
< 25 %	Tanah kadar organik rendah
25% - 75%	Tanah organik
> 75%	Tanah gambut

Dalam beberapa kasus, tanah lempung juga dapat bersifat organik yang disebut sebagai lempung organik. Pengaruh zat organik pada tanah sangat besar dalam melemahkan kemampuan tanah dan kekerasan tanah (Hobbs, 1987).

2.5.2 Karakteristik Tanah Lunak

Tanah lunak memiliki beberapa karakteristik khusus yang membedakannya dengan jenis tanah lainnya yaitu sebagai berikut.

1. Daya dukung tanah rendah

Daya dukung tanah merupakan kemampuan tanah dalam menopang beban yang diberikan padanya. Pada tanah lunak, daya dukung tanah cenderung kecil karena rendahnya sudut geser tanah dan tingginya kandungan air pada tanah.

2. Kompresibilitas besar

Kompresibilitas merupakan peristiwa berkurangnya volume tanah saat mendapatkan tekanan atau beban dari luar. Tanah lunak memiliki kompresibilitas yang tinggi saat diberikan beban. Tanah lunak akan mudah termampatkan dan menyebabkan terjadinya penurunan segera (*intermediate settlement*) dan penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*) yang cukup besar dan mengganggu stabilitas struktur di atasnya.

3. Penurunan besar

Penurunan tanah merupakan peristiwa turunnya permukaan tanah dari titik awalnya dan menyebabkan terbentuknya ambles di permukaan. Imbas dari kompresibilitas yang tinggi pada tanah lunak menyebabkan penurunan pada tanah lunak cukup besar.

4. Kadar air tinggi

Tanah lunak cenderung memiliki nilai kadar air yang tinggi. Tanah lunak sering dijumpai dalam kondisi berair. Kadar air tanah lunak bervariasi tergantung pada plastisitas tanah dan struktur tanahnya.

5. Kuat geser rendah

Kuat geser tanah merupakan gaya perlawanan yang dilakukan oleh butiran tanah terhadap pembebanan yang mengganggu stabilitas tanah. Kuat geser tanah bergantung pada kohesi dan sudut gesek internal tanah (Hardiyatmo, 2019a). Kandungan air dalam tanah dapat melemahkan kuat geser tanah (Utami & Caroline, 2018). Tanah lunak dengan kadar air tinggi memiliki kuat geser rendah.

6. Permeabilitas rendah

Permeabilitas tanah merupakan kemampuan suatu material tanah untuk meloloskan air melalui ruang pori. Kondisi jenuh air pada tanah lunak mengakibatkan nilai permeabilitas tanah menjadi sangat kecil.

2.5.3 Parameter Tanah Lunak

Beberapa parameter kuantitatif yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan tanah lunak dijelaskan sebagai berikut.

1. Modulus *young* tanah (E)

Nilai modulus *young* tanah merepresentasikan besarnya nilai elastisitas tanah yang didefinisikan sebagai perbandingan tegangan regangan tanah. Nilai modulus *young* dapat diperoleh lewat uji triaksial. Bowles (1984) mendefinisikan perkiraan nilai modulus *young* tanah lunak seperti pada Tabel 2.6.

Tabel 2. 6 Perkiraan Nilai Modulus *Young* (E) Tanah Lunak

Jenis tanah	E (kg/cm ²)
Sangat lunak	3 – 30
Lunak	20 – 40
Sedang	45 - 90
Keras	70 - 200
Berpasir	300 - 425

(Sumber : Bowles, 1984)

2. Berat jenis tanah (G_s)

Berat jenis tanah didefinisikan sebagai perbandingan berat volume tanah butiran padat dengan berat volume air pada temperatur tertentu. Berat jenis tanah diperoleh lewat pengujian berat jenis di laboratorium. Nilai berat jenis tanah bergantung pada komposisi dan jenis tanah yang diuji. Untuk lempung organik yang cenderung lunak, nilai berat jenis berkisar antara 2,58 – 2,65 (Das, 1994). Taksiran berat jenis berbagai tanah menurut Das (1994) ditampilkan pada Tabel 2.7.

Tabel 2. 7 Berat Jenis (G_s) Tanah Lunak

Jenis tanah	G_s
Kerikil	> 2,7
Pasir	2,65 – 2,68
Lanau anorganik	2,62 – 2,68
Lempung organik	2,58 – 2,65
Lempung anorganik	2,68 – 2,75
Humus	1,37
Gambut	1,25 – 1,80

(Sumber : Das, 1994)

3. *Poisson Ratio* (ν)

Poisson ratio merupakan perbandingan antara regangan tanah arah tegak lurus dan longitudinal saat mengalami tegangan. Taksiran nilai *poisson ratio* tanah menurut Das (1994) ditampilkan pada Tabel 2.8.

Tabel 2. 8 *Poisson Ratio* (ν) Tanah Lunak

Jenis Tanah	ν
Lempung jenuh	0,4 – 0,5
Lempung tak jenuh	0,1 – 0,3
Lempung berpasir	0,2 – 0,3
Lanau	0,3 – 0,35
Pasir	0,1 – 1
Batuan	0,1 – 0,4
Loss	0,3 – 0,4

(Sumber : Das, 1994)

4. Kuat geser *undrained* (C_u)

Kuat geser *undrained* merupakan tegangan geser maksimum yang dapat ditahan tanah tanpa mengalami perubahan volume. Kondisi tak terdrainase menunjukkan bahwa air selama pembebanan tidak diizinkan keluar dari tanah. Taksiran kuat geser *undrained* menurut Das (1994) ditampilkan pada Tabel 2.9.

Tabel 2. 9 Nilai Kuat Geser *Undrained* (C_u) Tanah Lunak

Konsistensi tanah	Taksiran harga C_u (KPa)	Taksiran harga N- SPT
Sangat lunak	0 – 12,5	0 -2,5
Lunak	12,5 -25	2,5 – 5
Menengah	25 – 50	5 – 10
Kaku	50 – 100	10 – 20
Sangat kaku	100 – 200	20 – 40
Keras	> 200	> 40

(Sumber: Das, 1994)

5. Kohesi (c)

Gaya tarik menarik antar partikel tanah disebut sebagai kohesi tanah. Nilai kohesi tanah diperoleh dari pengujian triaksial atau uji geser langsung. Taksiran nilai kohesi tanah lunak menurut Das (1994) di dalam *Handbook of Geotechnical Engineering* dijelaskan dalam Tabel 2.10 berikut.

Tabel 2. 10 Kohesi (c) Tanah Lunak

Konsistensi Tanah	c (kN/m ²)
Sangat lunak	0 – 12
Lunak	12 – 25
Sedang	25 – 50
Kaku	50 – 100
Sangat kaku	100 – 200
Keras	> 200

(Sumber: Das, 1994)

6. Kuat tekan bebas (q_u)

Kuat tekan bebas merupakan besarnya tegangan aksial yang dapat ditahan oleh tanah sebelum runtuh. Pada kuat tekan bebas, kekangan dari arah tegak lurus tanah (σ_3) = 0. Taksiran kuat tekan bebas tanah lunak oleh Peck et al. (1953) ditampilkan dalam Tabel 2.11.

Tabel 2. 11 Kuat Tekan Bebas (q_u) Tanah Lunak

Konsistensi tanah	Identifikasi lapangan	q_u (kN/m ²)
Sangat lunak	Dengan mudah ditembus beberapa inci dengan kepalan tangan	< 25
Lunak	Dengan mudah ditembus beberapa inci dengan ibu jari	25 – 50
Sedang	Dapat ditembus beberapa inci pada kekuatan sedang dengan ibu jari	50 -100
Kaku	Melekuk bila ditekan dengan ibu jari, tapi dengan kekuatan besar	100 – 200
Sangat kaku	Melekuk bila ditekan dengan kuku ibu jari	200 – 400
Keras	Dengan kesulitan melekuk bila ditekan dengan kuku ibu jari	> 400

(Sumber: Peck et al., 1953)

2.6 Pengaruh Tanah Lunak pada Konstruksi Perkerasan

Meskipun perkerasan jalan telah dirancang sebaik mungkin, kinerjanya akan tidak memuaskan bila tanah dasar yang menjadi penumpu seluruh lapisan perkerasan berada pada kualitas yang buruk. Tanah dasar merupakan bagian dasar perkerasan yang menumpu lapis fondasi dan perkerasan sehingga integritas dari struktur perkerasan dan stabilitas struktur tanah dasar sangat diperhatikan. Jika tanah dasar lunak, maka tanah dasar tidak mampu menahan dan menerima distribusi pembebanan kendaraan dengan baik sehingga berdampak pada deformasi (penurunan) yang berlebihan. Penurunan ini hampir mustahil seragam pada seluruh daerah pelat sehingga dapat terjadi retak (*cracking*). Beberapa permasalahan yang mungkin terjadi akibat tanah dasar lunak pada perkerasan konstruksi antara lain sebagai berikut.

1. Penurunan tidak seragam (*differential settlement*)
2. Retakan (*cracking*) pada pelat
3. Daya dukung tanah rendah sehingga dibutuhkan timbunan tanah yang tebal atau perkerasan yang sangat tebal dan berdampak pada peningkatan biaya konstruksi.
4. Tolakan ke atas (*uplift*)

2.7 Metode Elemen Hingga Tiga Dimensi

Metode elemen hingga atau *finite element method* merupakan prosedur analisis numeris yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dalam bidang ilmu rekayasa (*engineering*) seperti analisis deformasi, tegangan, regangan, transfer kalor, dan permasalahan lainnya. Metode elemen hingga membagi domain kontinu menjadi elemen-elemen kecil yang lebih sederhana, dan kemudian menerapkan persamaan yang mengatur perilaku elemen-elemen tersebut untuk mendapatkan solusi aproksimasi untuk seluruh domain. Perkembangan teknologi dan pengembangan *software* yang semakin mutakhir membuat proses simulasi desain teknik secara elemen hingga menjadi mudah dan cepat (Suhendro, 2019). Peningkatan kemampuan hitung

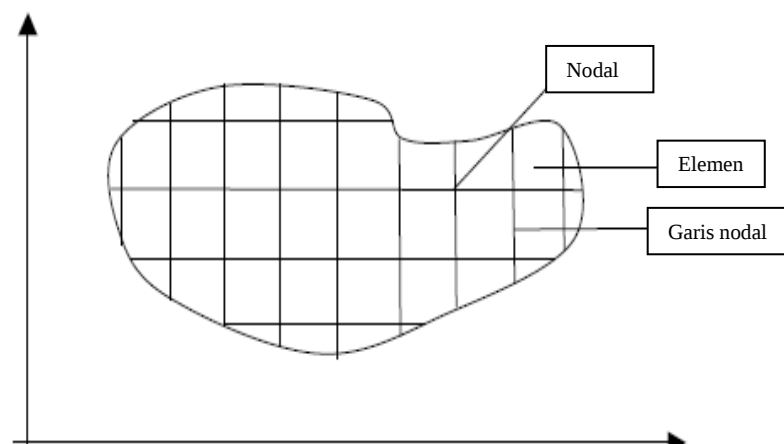
dari komputer menyebabkan kemungkinan yang semakin besar untuk melakukan analisis persoalan teknik yang besar dan kompleks.

Dalam penelitian ini, akan digunakan metode analisis elemen hingga tiga dimensi (*3D Finite Element Method*) dengan bantuan *software* Plaxis 3D. Plaxis 3D adalah salah satu program yang dikembangkan dari metode elemen hingga khusus untuk keperluan analisis deformasi dan stabilitas dalam geoteknik. Dengan *input* grafis sederhana, Plaxis 3D mampu menyusun model elemen hingga yang kompleks dengan tepat. *Output* yang ditampilkan berupa tabel maupun grafik hasil perhitungan secara rinci.

Secara garis besar, langkah-langkah dalam analisis metode elemen hingga antara lain sebagai berikut (Suhendro, 2019).

1. Diskritisasi dan penentuan tipe elemen

Diskritisasi adalah proses membagi elemen yang akan dianalisis menjadi elemen yang lebih kecil dalam batas (*boundary*) tertentu. Dalam diskritisasi elemen, akan terbentuk komponen diskritisasi baru yaitu nodal, elemen, dan garis nodal. Bentuk elemen pada setiap bidang dapat berbeda tergantung dari proyeksi material terhadap sumbu. Elemen garis digunakan untuk material 1D. Elemen segitiga digunakan untuk material 2D. Elemen tetrahedral digunakan untuk material 3D. Ilustrasi diskritisasi elemen ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2. 13 Diskritisasi elemen.

2. Penentuan fungsi perpindahan
Berdasarkan setiap elemen yang terbentuk, kemudian disusun matriks fungsi perpindahan pada setiap nodalnya. Matriks fungsi perpindahan disusun pada arah vertikal dan horizontal. Matriks perpindahan yang diperoleh masih dalam sumbu lokal.
3. Penentuan matriks hubungan tegangan-deformasi
Vektor tegangan dan vektor regangan dari setiap nodal yang terbentuk kemudian disusun untuk dibentuk hubungan antara tegangan regangan dan modulus material. Hasil perolehan matriks ini masih dalam sumbu lokal.
4. Penurunan persamaan elemen
Semua matriks hubungan yang telah dibuat pada pembahasan sebelumnya kemudian diturunkan untuk memperoleh formulasi kekakuan setiap elemen. Metode energi potensial minimum lazim digunakan untuk memperoleh formulasi ini.
5. Penggabungan matriks elemen lokal ke matriks elemen global
Formulasi yang telah diperoleh selanjutnya dikalikan matriks transformasi global untuk mengonversi seluruh persamaan sumbu lokal ke dalam sumbu global.

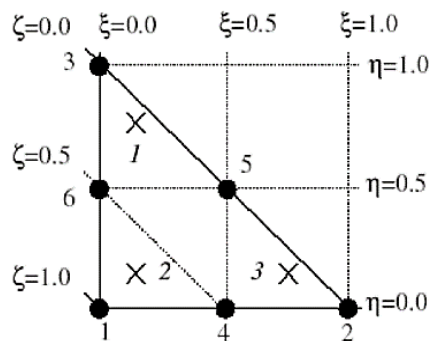
2.7.1 Diskritisasi Elemen Luasan Dasar pada Plaxis 3D

Basis diskritisasi elemen untuk seluruh elemen tipe luasan (*area*) dan permukaan (*surfaces*) berasal dari Plaxis 2D. Untuk elemen tipe luasan dan permukaan, terdapat dua elemen dasar diskritisasi yaitu elemen segitiga 6 nodal dan elemen segitiga 15 nodal. Elemen ini dibuat dalam proses *meshing* pada analisis 2D dan digunakan untuk *meshing* elemen ruang pada model 3D (Plaxis 3D, 2023c). Model pelat perkerasan dan fondasi kaison sebagai cakar perkerasan dimodelkan dengan tipe elemen ini. Elemen ini memiliki 5 derajat kebebasan yaitu tiga translasi (u_x , u_y , u_z) dan dua rotasi (ϕ_y , ϕ_z).

1. Elemen segitiga 6 nodal (6-node triangular element)

Untuk elemen segitiga terdapat dua koordinat lokal (ξ dan η). Sebagai tambahan koordinat bantu, digunakan koordinat tambahan yaitu $\zeta = 1 - \xi - \eta$. Elemen segitiga 6 nodal memberikan interpolasi perpindahan orde kedua. Fungsi bentuk N_i pada setiap simpul dapat dilihat sebagai berikut (Plaxis 3D, 2023c).

$$\begin{array}{lcl} N_1 & = & \zeta (2 \zeta - 1) \\ N_2 & = & \xi (2 \xi - 1) \\ N_3 & = & \eta (2 \eta - 1) \end{array} \quad \left| \quad \begin{array}{lcl} N_4 & = & 4 \zeta \xi \\ N_5 & = & 4 \xi \eta \\ N_6 & = & 4 \eta \zeta \end{array} \right. \dots\dots\dots \text{(Pers 2.1)}$$

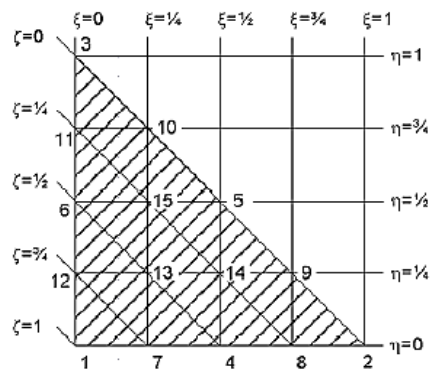


Gambar 2. 14 Elemen segitiga 6 nodal, penomoran lokal, posisi titik nodal (o) titik integrasi (x), dan fungsi *shape*.

2. Elemen segitiga 15 nodal (15-node triangular element)

Untuk elemen segitiga terdapat dua koordinat lokal (ξ dan η). Sebagai tambahan koordinat bantu, digunakan koordinat tambahan yaitu $\zeta = 1 - \xi - \eta$. Fungsi bentuk N_i pada setiap simpul dapat dilihat sebagai berikut (Plaxis 3D, 2023c).

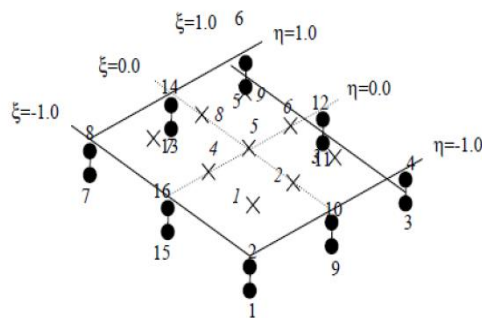
$$\begin{array}{lcl} N_1 & = & \zeta (4 \zeta - 1) (4 \zeta - 2) (4 \zeta - 3) / 6 \\ N_2 & = & \xi (4 \xi - 1) (4 \xi - 2) (4 \xi - 3) / 6 \\ N_3 & = & \eta (4 \eta - 1) (4 \eta - 2) (4 \eta - 3) / 6 \\ N_4 & = & 4 \zeta \xi (4 \zeta - 1) (4 \xi - 1) \\ N_5 & = & 4 \xi \eta (4 \xi - 1) (4 \eta - 1) \\ N_6 & = & 4 \eta \zeta (4 \eta - 1) (4 \zeta - 1) \\ N_7 & = & 8 \xi \zeta (4 \zeta - 1) (4 \zeta - 2) / 3 \\ N_8 & = & 8 \zeta \xi (4 \xi - 1) (4 \xi - 2) / 3 \\ N_9 & = & 8 \eta \xi (4 \xi - 1) (4 \xi - 2) / 3 \\ N_{10} & = & 8 \xi \eta (4 \eta - 1) (4 \eta - 2) / 3 \\ N_{11} & = & 8 \zeta \eta (4 \eta - 1) (4 \eta - 2) / 3 \\ N_{12} & = & 8 \eta \zeta (4 \zeta - 1) (4 \zeta - 2) / 3 \\ N_{13} & = & 32 \eta \xi \zeta (4 \zeta - 1) \\ N_{14} & = & 32 \eta \xi \zeta (4 \xi - 1) \\ N_{15} & = & 32 \eta \xi \zeta (4 \eta - 1) \end{array} \quad \left| \quad \dots\dots\dots \text{Pers. 2.2)} \right.$$



Gambar 2. 15 Elemen segitiga 15 nodal, penomoran lokal, posisi titik nodal (o) titik integrasi (x), dan fungsi *shape*.

3. Elemen khusus *interface* (bidang kontak)

Berbeda dengan elemen luasan, elemen *interface* memiliki pasangan nodal, bukan nodal tunggal. *Interface* diintegrasikan secara numerik menggunakan Integrasi Gauss 6 titik. Jarak antara dua nodal dari tiap pasangan nodal adalah nol. Setiap nodal memiliki tiga derajat kebebasan translasi (u_x , u_y , u_z). Sebagai hasilnya, *interface* memungkinkan perpindahan diferensial antara pasangan nodal (tergelincir dan celah).



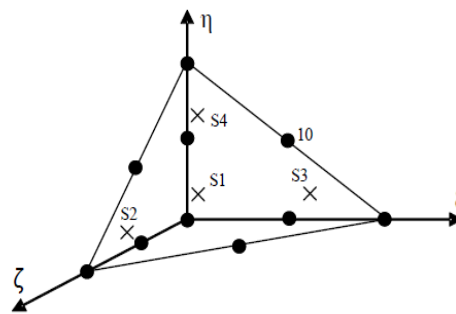
Gambar 2. 16 Elemen *interface*, penomoran lokal, posisi titik nodal (o) dan titik integrasi (x).

2.7.2 Diskritisasi Elemen Ruang pada Plaxis 3D

Elemen ruang digunakan untuk memodelkan volume tanah dalam program Plaxis 3D. Elemen ini dimodelkan dengan menggunakan elemen tetrahedral 10 nodal. Elemen tetrahedral 10-simpul dibuat

dalam prosedur mesh 3D. Jenis elemen ini menyediakan interpolasi perpindahan orde kedua. Untuk elemen tetrahedral terdapat tiga koordinat lokal (ξ , η dan ζ). Fungsi bentuk N_i pada setiap simpul dapat dilihat sebagai berikut (Plaxis 3D, 2023c).

$$\begin{array}{l|l}
 N_1 = (1 - \xi - \eta - \zeta)(1 - 2\xi - 2\eta - 2\zeta) & N_6 = 4\xi\zeta \\
 N_2 = \zeta(2\zeta - 1) & N_7 = 4\xi(1 - \xi - \eta - \zeta) \\
 N_3 = \xi(2\xi - 1) & N_8 = 4\eta(1 - \xi - \eta - \zeta) \quad \dots\dots(\text{Pers. 2.3}) \\
 N_4 = \eta(2\eta - 1) & N_9 = 4\eta\zeta \\
 N_5 = 4\zeta(1 - \xi - \eta - \zeta) & N_{10} = 4\xi\eta
 \end{array}$$



Gambar 2. 17 Elemen tetrahedral 10 nodal, penomoran lokal, posisi titik nodal (o) titik integrasi (x), dan fungsi *shape*.

2.7.3 Model Material Elastis Linear dan Mohr Coulomb pada Plaxis 3D

Ketika tanah dibebani, tegangan regangan akan bertambah secara linear. Ketika pembebanan dilepaskan sebelum mencapai kondisi plastisnya, tegangan regangan akan berkurang, namun hampir tidak pernah kembali ke titik tegangan awal. Perilaku ini berbeda dengan material elastis lainnya yang akan kembali ke titik tegangan awal. Oleh karena itu, tanah sering dianggap sebagai material elastoplastis. Dalam penelitian ini, tanah akan dimodelkan dengan model material Mohr-Coulomb. Model Mohr-Coulomb adalah model *linear elastic perfectly plastic model* yang dapat digunakan sebagai perkiraan pertama perilaku tanah. Bagian elastis linier dari model Mohr-Coulomb didasarkan pada hukum Hooke tentang elastisitas isotropik (elastisitas linier sempurna).

Bagian plastis sempurna didasarkan pada kriteria kegagalan Mohr-Coulomb (Plaxis 3D, 2023a).

1. Model elastis linear (Hukum Hooke)

Model elastis linear digunakan untuk menggambarkan perilaku tanah saat masih berada dalam kondisi elastis. Meskipun material tanah tidak benar-benar elastis melainkan elastoplastis, namun pendekatan elastis linear masih dapat diterima. Model elastis linear menandakan adanya hubungan linear antara pertambahan tegangan dan regangan pada tanah. Model material tanah umumnya dinyatakan sebagai hubungan antara peningkatan tegangan efektif dan regangan efektif yang dinyatakan dalam hubungan

$$\sigma' = M \cdot \varepsilon' \dots\dots\dots (Pers. 2.4)$$

M adalah simbol untuk matriks kekakuan material. Perilaku linear material digambarkan berdasarkan Hukum Hooke. Hukum Hooke yang digunakan oleh Plaxis 3D dijelaskan sebagai berikut. Formula ini digunakan untuk semua model *linear elastic* lainnya.

$$\begin{bmatrix} \dot{\sigma}'_{xx} \\ \dot{\sigma}'_{yy} \\ \dot{\sigma}'_{zz} \\ \dot{\sigma}'_{xy} \\ \dot{\sigma}'_{yz} \\ \dot{\sigma}'_{zx} \end{bmatrix} = \frac{E'}{(1-2\nu')(1+\nu')} \begin{bmatrix} 1-\nu' & \nu' & \nu' & 0 & 0 & 0 \\ \nu' & 1-\nu' & \nu' & 0 & 0 & 0 \\ \nu' & \nu' & 1-\nu' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}'_{xx} \\ \dot{\varepsilon}'_{yy} \\ \dot{\varepsilon}'_{zz} \\ \dot{\varepsilon}'_{xy} \\ \dot{\varepsilon}'_{yz} \\ \dot{\varepsilon}'_{zx} \end{bmatrix} \quad (Pers. 2.5)$$

Dua parameter penting yang dipakai dalam formula ini adalah modulus Young efektif (E') dan *poisson ratio* efektif (ν') Mengacu pada Hukum Hooke, diperoleh hubungan antara E dengan modulus

kekakuan lainnya seperti G (modulus geser), K (modulus *bulk*), dan E_{oed} (modulus oedometer) adalah sebagai berikut.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \dots\dots\dots (\text{Pers. 2.6})$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \dots\dots\dots (\text{Pers. 2.7})$$

$$E_{\text{oed}} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \dots\dots\dots (\text{Pers. 2.8})$$

Nilai E dan ν akan di-*input* pada pemodelan material awal di Plaxis 3D dan selanjutnya seluruh parameter diatas akan dihitung secara otomatis oleh Plaxis 3D. Model material elastis linear juga digunakan untuk pemodelan struktur beton pada perkerasan sesuai dengan yang direkomendasikan oleh Plaxis (Plaxis 3D, 2023a).

2. Model plastis sempurna (Mohr-Coulomb)

Prinsip dasar elastoplastisitas adalah bahwa regangan (ε') dan laju regangan diuraikan menjadi bagian elastis (ε'^e) dan bagian plastis (ε'^p) :

$$\varepsilon' = \varepsilon'^e + \varepsilon'^p \dots\dots\dots (\text{Pers. 2.9})$$

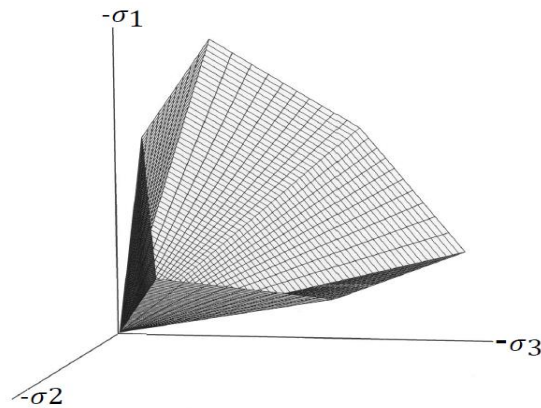
Substitusi Persamaan 2.9 ke Persamaan 2.4 menghasilkan:

$$\sigma' = M. (\varepsilon'^e - \varepsilon'^p) \dots\dots\dots (\text{Pers. 2.10})$$

Menurut teori klasik plastisitas, laju regangan plastis sebanding dengan turunan dari hasil fungsi hasil leleh dengan tegangan. Ini berarti bahwa laju regangan plastis dapat direpresentasikan sebagai vektor tegak lurus terhadap permukaan leleh. Kondisi leleh Mohr-Coulomb terdiri dari enam fungsi leleh yang disusun dalam bentuk *principal stress* sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
f_{1a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3)\sin(\phi) - c\cos(\phi) \leq 0 & a) \\
f_{2a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_2)\sin(\phi) - c\cos(\phi) \leq 0 & b) \\
f_{2a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1)\sin(\phi) - c\cos(\phi) \leq 0 & c) \quad (\text{Pers. 2.11}) \\
f_{2b} &= \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)\sin(\phi) - c\cos(\phi) \leq 0 & d) \\
f_{3a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2)\sin(\phi) - c\cos(\phi) \leq 0 & e) \\
f_{3b} &= \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_1)\sin(\phi) - c\cos(\phi) \leq 0 & f)
\end{aligned}$$

Dua parameter model plastis yang muncul dalam fungsi leleh adalah sudut gesek ϕ yang sudah dikenal dan kohesi c . Tiap individual fungsi di atas memenuhi $f_i = 0$ dan secara bersama-sama menggambarkan sebuah kerucut heksagonal di ruang *principal stress* seperti pada Gambar 2.18



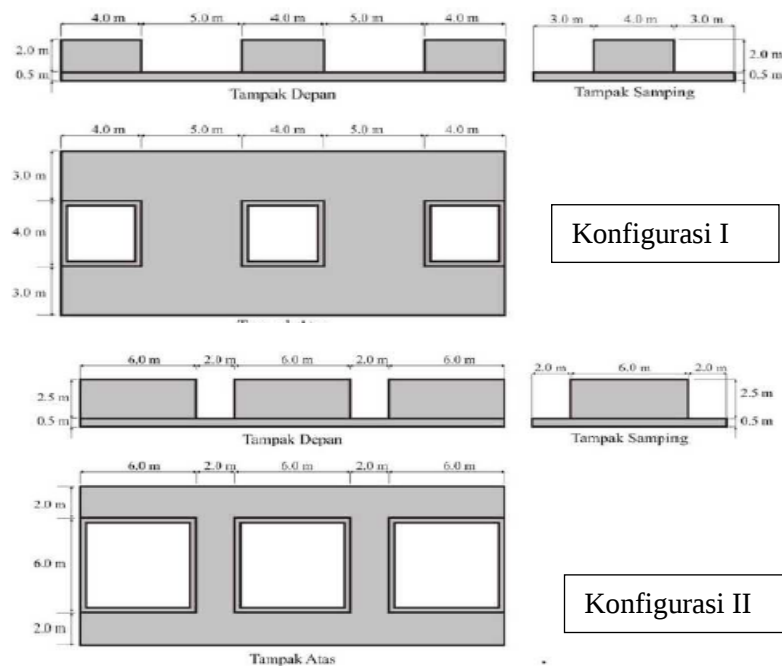
Gambar 2. 18 Fungsi leleh Mohr-Coulomb dalam ruang *principal stress*.

Parameter dasar yang dibutuhkan dalam memodelkan material dengan Mohr-Coulomb pada Plaxis 3D adalah sebagai berikut.

1. Modulus Young ($E = \text{kN/m}^2$)
2. *Poisson Ratio* (ν tidak bersatuan)
3. Sudut gesek internal ($\phi = ^\circ$)
4. Kohesi ($c = \text{kN/m}^2$)
5. Sudut dilatansi ($\psi = ^\circ$)

2.8 Penelitian Terkait

Aspar et al. (2010) bertujuan untuk menentukan alternatif pemilihan model fondasi yang cocok digunakan untuk konstruksi *Submerged Floating Tunnel* (SFT). Konstruksi ini merupakan teknologi penyeberangan bawah laut dengan panjang bentang relatif pendek. Konstruksi ini merupakan model alternatif lain dari *underground tunnel*. Pada penelitian ini, Aspar mengusulkan penggunaan fondasi berupa pelat yang diperkaku dengan fondasi kaisan dalam konfigurasi tertentu seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.19.



Gambar 2. 19 Model konfigurasi fondasi kaisan (Aspar et al., 2010)

Pada konfigurasi I, berat gravitasi pelat setara dengan 2600 kN dan pada konfigurasi II, beban gravitasi pelat setara dengan 4445 kN. Konfigurasi I didesain untuk menahan gaya tarik sebesar 1019 kN dan konfigurasi II didesain untuk menahan gaya tarik sebesar 3950 kN. Berdasarkan hasil analisis, untuk konfigurasi I dihasilkan deformasi elastik sebesar 18 – 21 mm dan untuk konfigurasi II dihasilkan deformasi elastik sebesar 22 – 24 mm. Deformasi ini memberikan hasil yang memuaskan sehingga disimpulkan

bahwa usulan pelat dengan diperkaku oleh fondasi kaison mampu menjadi alternatif dalam fondasi SFT.

Ikbar (2020) dengan judul Studi Eksperimental Penurunan Model Cakar Ayam Modifikasi (CAM) pada Tanah Gambut di Bawah Timbunan bertujuan untuk menyelidiki pengaruh beban timbunan terhadap perilaku model cakar ayam modifikasi dan mengetahui besar penurunannya melalui uji di laboratorium. Beban yang diberikan merupakan beban merata secara bertahap sebanyak tiga tahapan. Jumlah cakar yang digunakan sebanyak satu baris dan diuji di atas tanah gambut yang lunak di daerah Riau. Dimensi CAM sebesar 75 cm x 25 cm x 3 cm. Deformasi yang dihasilkan sebesar 12 mm pada akhir pembacaan dan rerata penurunan adalah 4 mm. Bila dibandingkan dengan pelat polos tebal 15 mm, terjadi reduksi penurunan sekitar 14% akibat fungsi cakar. Penambahan jumlah baris dan cakar akan mereduksi penurunan lebih besar.

Puri (2015) dengan judul Studi Parametrik Perkerasan Sistem Pelat Terpaku pada Tanah Lunak bertujuan untuk mendesain sistem pelat terpaku yang mampu memberikan kinerja optimal serta mendekati kinerja sistem CAM pada dimensi pelat dan beban yang sama. Dimensi pelat digunakan sama persis dengan pelat CAM Suhendro (Hardiyatmo, 2008). Diameter tiang juga disamakan. Variasi dilakukan pada panjang fondasi. Paku dibuat kurus dan langsing. Analisis dilakukan untuk pembebanan monotonik pada posisi beban sentris dan pinggir. Hasil analisis menunjukkan kinerja perkerasan dengan sistem pelat terpaku menyerupai kinerja sistem CAM.. Bahkan, pada lebar pelat yang sama, kinerja pelat terpaku lebih baik dibanding CAM. Penambahan panjang atau pengurangan jarak antar paku meningkatkan kinerja sistem pelat terpaku.

Rekapitulasi penelitian terkait dan pembaruan pada penelitian sekarang ditabelkan dalam Tabel 2.12 sebagai berikut.

Tabel 2. 12 Penelitian terkait

Nama Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Perbedaan dengan penelitian sekarang
Aspar et al (2010)	Alternatif fondasi terowongan layang Dalam laut untuk prasarana transportasi	Alternatif penggunaan fondasi kaison sebagai paku pelat untuk konstruksi <i>Submerged Floating Tunnel</i> di atas tanah lunak dan berair di bawah air mampu menahan beban tarik hingga 3950 kN. Hasil penurunan akibat pembebanan mencapai 18-24 mm. Fondasi kaison dimodelkan dalam bentuk persegi satu baris tiga buah dengan perbedaan konfigurasi. Pelat yang diperkaku dengan fondasi kaison dapat menjadi alternatif fondasi SFT.	Pelat yang dipaku dengan fondasi kaison dicoba untuk pembebanan jalan untuk konstruksi darat di atas tanah lempung lunak, ekspansif, dan berair. Bentuk yang dipilih adalah lingkaran tunggal dengan konfigurasi susunan serta diameter dan panjang fondasi yang lebih bervariasi.
Ikbar (2020)	Studi Eksperimental Penurunan Model Cakar Ayam Modifikasi (CAM) pada Tanah Gambut di Bawah Timbunan	Menyelidiki pengaruh beban timbunan terhadap perilaku model cakar ayam modifikasi dan mengetahui besar penurunannya melalui uji di laboratorium.. Dimensi CAM sebesar 75 cm x 25 cm x 3 cm, beban diberikan secara bertahap. Deformasi yang dihasilkan sebesar 12 mm pada akhir pembacaan dan rerata penurunan adalah 4 mm. Bila dibandingkan dengan pelat polos tebal 15 mm , terjadi reduksi penurunan sekitar 14%	Cakar ayam beton diganti dengan fondasi kaison. Jarak antar cakar dipertahankan dan diuji terhadap variasi diameter, panjang, dan rasio panjang/diameter. Pembebanan menggunakan aturan pembebanan jalan.

Tabel 2.12 (lanjutan)

		akibat fungsi cakar. Penambahan jumlah baris dan cakar akan mereduksi penurunan lebih besar	
Puri (2015)	Studi Parametrik Perkerasan Sistem Pelat Terpaku pada Tanah Lunak	Mendesain sistem pelat terpaku yang mampu memberikan kinerja optimal serta mendekati kinerja sistem CAM pada dimensi pelat dan beban yang sama. Dimensi pelat yang digunakan dibuat sama persis dengan pelat CAM Suhendro (Hardiyatmo, 2008). Diameter tiang juga disamakan. Variasi dilakukan pada panjang fondasi. Paku dibuat kurus dan langsing. Analisis dilakukan untuk pembebanan monotonik pada posisi beban sentris dan pinggir. Hasil analisis menunjukkan kinerja perkerasan dengan sistem pelat terpaku menyerupai kinerja sistem CAM..	Mendesain sistem pelat perkerasan dengan fondasi kaison sebagai cakar. Paku beton diganti dengan fondasi kaison. Jarak antar paku dipertahankan dan diuji terhadap variasi diameter, panjang, dan rasio panjang/diameter. Pembebanan menggunakan aturan pembebanan jalan. Tanah yang digunakan sama dengan tanah Puri (2015) yaitu lempung Waru-Surabaya.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Data Tanah Lunak

Penelitian ini menggunakan data sekunder berupa tanah lunak lempung di Kecamatan Waru, Surabaya, Jawa Timur di atas lokasi rencana trase Jalan Tol Waru, dekat Bandara Internasional Juanda. Lokasi ini sekarang telah dibangun Jalan Tol Waru diatasnya. Data tanah ini disamakan dengan data tanah lunak yang digunakan oleh Suhendro dalam penelitian skala penuh (*full scale*) cakar ayam modifikasi dan Suhendro dalam penelitian cakar ayam Sedyatmo di Waru, Jawa Timur. Hasil uji *soil properties* dan *soil engineering* tanah lunak Waru, Surabaya yang diperoleh melalui data sekunder dari Suhendro terdapat di dalam penelitian Puri (2015) yang berjudul “Studi Parametrik Perkerasan Sistem Pelat Terpaku pada Tanah Lunak” ditampilkan pada Tabel 3.1 sebagai berikut.

Tabel 3. 1 Uji *Soil Properties* dan *Soil Engineering* Tanah Lunak Waru (Puri, 2015)

No.	Parameter	Simbol	Lempung Lunak Waru
1	Model material	Model	Mohr-Coulomb
2	Perilaku material	Type	Undrained
3	Berat volume <i>unsaturated</i>	γ	16 kN/m ³
4	Berat volume <i>saturated</i>	γ_{sat}	17 kN/m ³
5	Modulus Young	E	4000 kN/m ²
6	<i>Poisson Ratio</i>	v	0,35
7	Kohesi	c	20 kN/m ²
8	Sudut gesek internal	ϕ	0
9	Sudut dilatasi	ψ	0
10	Faktor reduksi <i>interface</i> : Lempung lunak – beton	R _{inter}	0,8
11	Koefisien tekanan tanah diam	K ₀	0,9130

3.2 Instrumen Penelitian

Instrumen penelitian merupakan alat atau fasilitas yang digunakan oleh peneliti dalam melakukan proses penelitian mulai dari melakukan analisis, mengolah data, dan menyusun hasil penelitian. Beberapa alat yang digunakan dalam melakukan penelitian ini sebagai berikut.

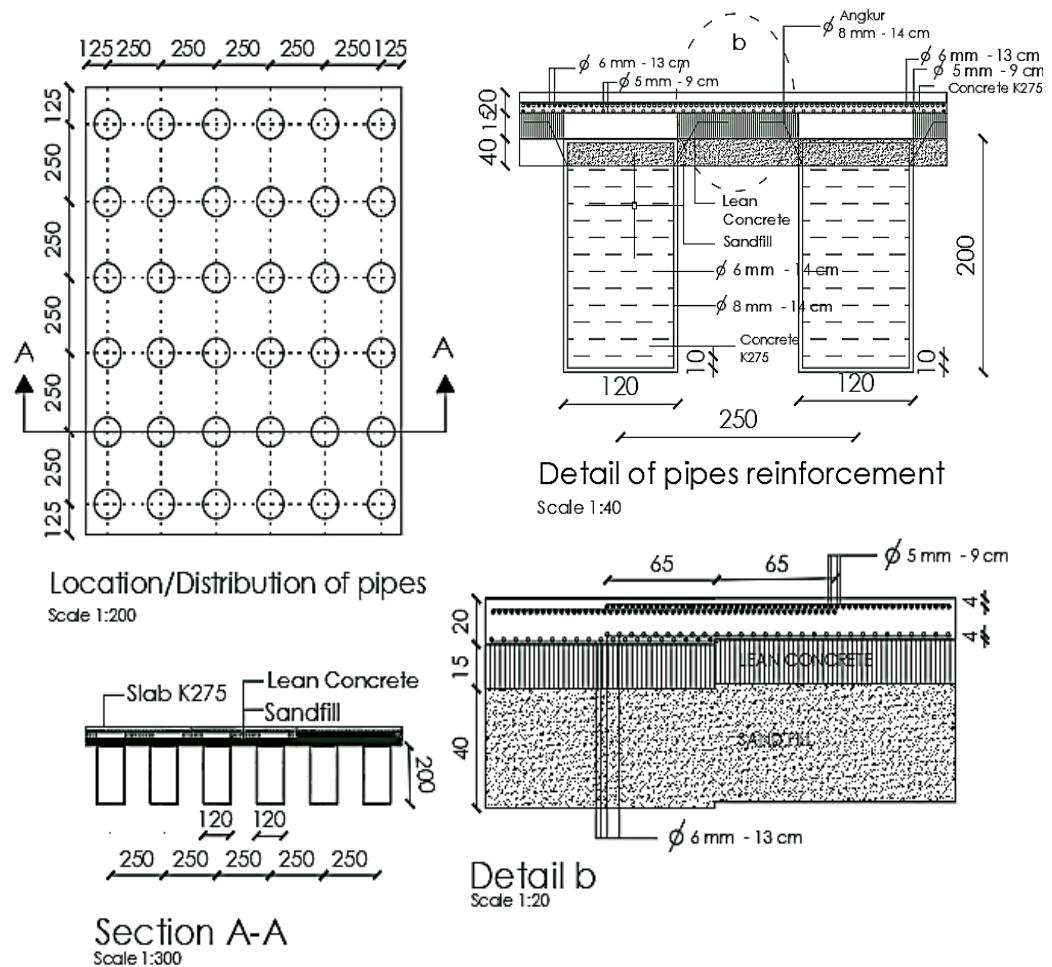
1. Laptop
2. *Software* PLAXIS 3D Advanced CONNECT Edition (24.01.00.1060) *trial version*.
3. *Software* Microsoft Word 2016
4. *Software* OriginPro Learning Edition

3.3 Pemodelan Cakar Ayam Sedyatmo

Tipikal cakar ayam Sedyatmo yang digunakan sebagai bahan perbandingan dengan model fondasi kaison ditampilkan pada Gambar 3.1. Gambar tersebut menunjukkan tipikal perkerasan cakar ayam saat pertama kali diaplikasikan sebagai *runway*, *apron*, dan *taxiway* di Bandara Soekarno-Hatta.

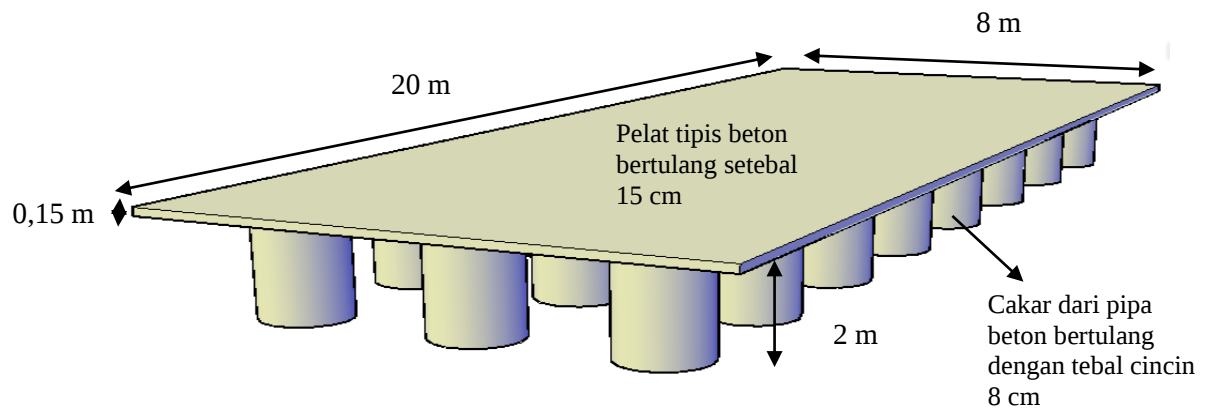
Komponen sistem perkerasan cakar ayam Sedyatmo dijelaskan dalam Hardiyatmo & Suhendro (2010) sebagai berikut. Komponen perkerasan tersusun dari pelat beton bertulang tipis dengan ketebalan 15 cm. Pipa-pipa beton bertulang sebagai cakar dipasang di bawah pelat dengan tebal cincin 8 cm, diameter 120 cm, dan panjang pipa 200 cm. Jarak antar pipa sebesar 250 cm. Lantai kerja beton mutu rendah dengan tebal 10 cm dipasang pada bagian bawah perkerasan. Mutu beton yang digunakan adalah K275 atau setara dengan 23 MPa. Berat volume beton sebesar 24 kN/m³. Angka poisson sebesar 0,15. Modulus elastisitas beton sebesar 22540 MPa.

Perhitungan asli perancangan cakar ayam Sedyatmo tidak pernah dipublikasikan sebelumnya. Sistem ini dirancang berdasarkan intuisi yang cermat dari perancanganya.

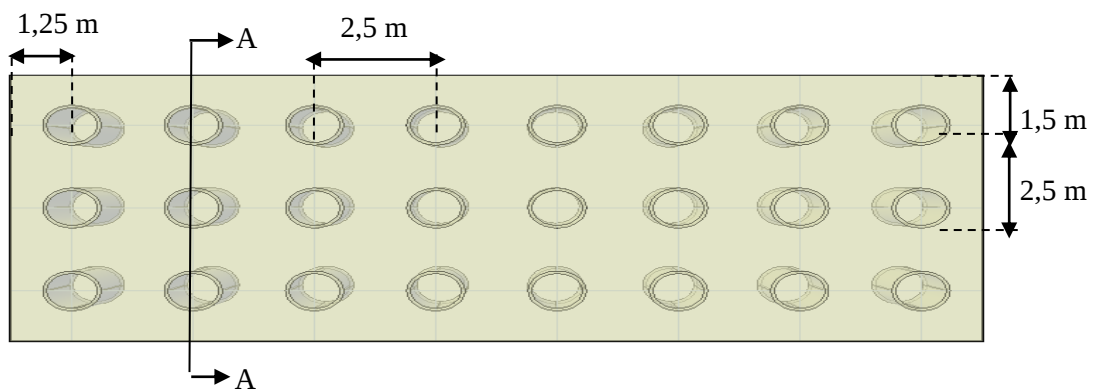


Gambar 3. 1 Tipikal asli cakar ayam Sedyatmo (Hardiyatmo & Suhendro, 2010)

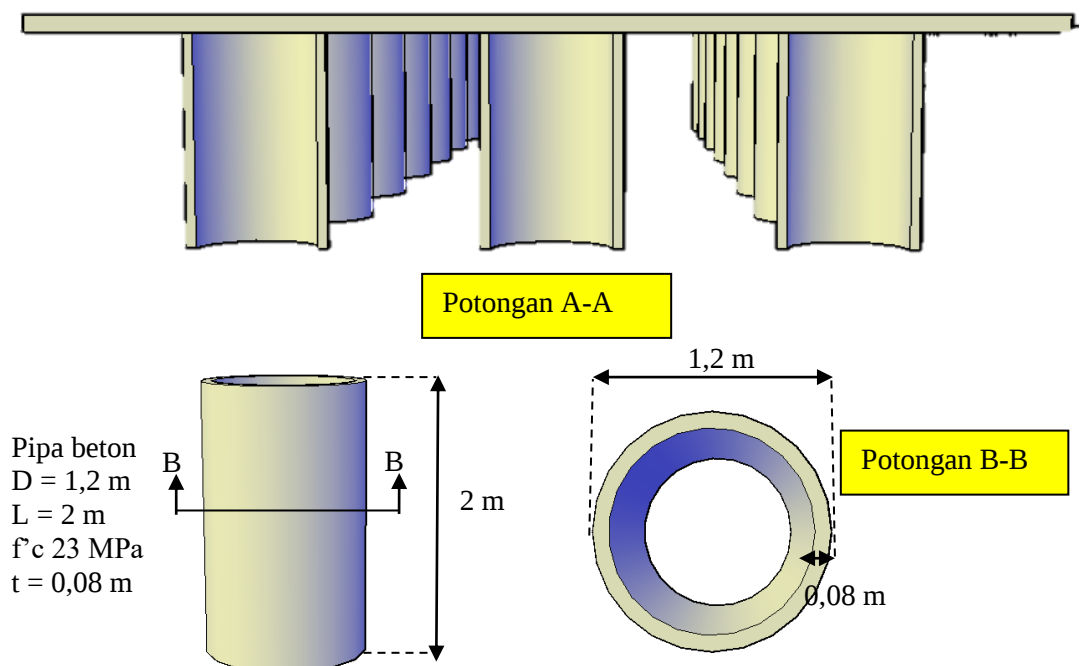
Dalam Gambar 3.1, dimensi pelat tidak diberi batasan atau ukuran yang pasti. Oleh karena itu, dalam penelitian ini digunakan dimensi pelat yang sesuai dengan lebar jalan dan panjang truk menurut aturan yang berlaku. Dimensi pelat yang digunakan berukuran 8 x 20 m. Lebar 8 m digunakan untuk menyesuaikan dengan ukuran lebar dua lajur jalan arteri primer tipe 8/2 T pada Persyaratan Teknis Jalan PUPR yang ditunjukkan dalam Tabel 3.2. Panjang 20 m menyesuaikan ukuran panjang kendaraan truk pada SNI 1725-2016 untuk Pembebanan Jembatan dengan ruang bebas di sekitarnya yang ditunjukkan pada Gambar 3.5. Pipa-pipa beton sebagai cakar dimodelkan monolit dengan pelat. Pelat dimodelkan di atas tipikal tanah lunak. Tipikal cakar ayam Sedyatmo yang akan dimodelkan sebagai pembanding dapat dilihat pada Gambar 3.2, 3.3, dan 3.4 berikut.



Gambar 3. 2 Tampak tiga dimensi cakar ayam Sedyatmo.



Gambar 3. 3 Tampak atas cakar ayam Sedyatmo.

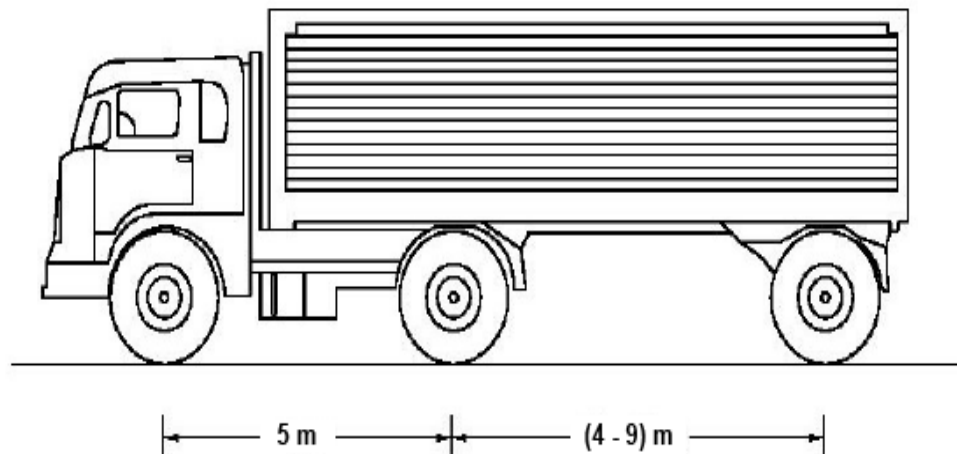


Gambar 3. 4 Potongan.melintang pelat dan cakar ayam Sedyatmo.

Tabel 3. 2 Acuan Penentuan Lebar Pelat

FUNGSI JALAN		Arteri dan kolektor				Lokal	Arteri dan Kolektor				Lokal	Lokal dan Lingkungan				Jalur khusus sepeda motor	
KELAS JALAN		I,II,III, Khusus				III	I,II,II,Khusus				II, III	III					
SPESIFIKASI PENYEDIAAN PRASARANA JALAN		JALAN RAYA (JLR)				JALAN SEDANG (JSD)				JALAN KECIL (JKC)							
TIPE JALAN		8/2-T	6/2-T	4/2-T				2/2-TT				2/2-TT	1/2-TT		1/1-TT		
		Tipe 2: Lebar median = 1,8 m; terdiri dari 0,50 m bahu dalam kiri, 0,80 m median yang dipakai lapak penyebrang, dan 0,50 m bahu dalam kanan															
		Untuk $V_D > 60$ km/jam, ada satu tipe:															
		Lebar median total = 2,00 m; terdiri dari bahu dalam kiri 0,75 m, median ditinggikan setinggi 1,10 m berupa penghalang beton 0,50 m dan bahu dalam kanan 0,75 m															
LEBAR BADAN JALAN paling kecil, m	Arteri	32,00	25,00	18,00	16,00	14,00	9,50	9,00	8,50	8,00	7,50	7,00	-	-	-		
	Kolektor	32,00	25,00	18,00	16,00	14,00	9,50	9,00	8,50	8,00	7,50	7,00	-	-	-		
	Lokal	32,00	25,00	18,00	16,00	14,00	9,50	9,00	8,50	8,00	7,50	7,00	5,50	5,00	3,50		
	Lingkungan		-		-		9,50	9,00	8,50	8,00	7,50	7,00	5,50	5,00	2,25		
PENAMPANG MELINTANG JALAN	RUMAJA paling kecil, m	Lebar, m	34,00	27,00	20,00	18,00	16,00	11,50	11,00	10,50	10,00	9,50	9,00	7,50	7,00	3,25	
		Tinggi, m			5,00				5,00			5,00		5,00		5,00	
		Dalam, m			1,50				1,50			1,50		1,50		1,50	
	RUMIJA paling kecil, m	Rekonstruksi jalan eksisting	34,00	27,00	20,00	18,00	16,00	11,50	11,00	10,50	10,00	9,50	9,00	7,50	7,00	6,00	
		Jalan baru	36,00	29,00	25,00	25,00	25,00	15,00	15,00	12,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	7,00	
	RUWASJA paling kecil, m	Arteri			15,00				15,00			10,00		-		-	
		Kolektor			5,00				5,00			5,00					
		Lokal			3,00				3,00			3,00					
		Jalan lingkungan			2,00				2,00			2,00					
		Jembatan			100,00				100,00			100,00					
	LEBAR SATUAN TEPI JALAN paling kecil, m				1,20				1,00			0,50					
	LEBAR AMBANG PENGAMAN paling kecil, m		1,00 atau sesuai kebutuhan						1,00 atau sesuai kebutuhan						-	-	
	KEMIRINGAN NORMAL PERKERASAN JALAN (%)		2,00 – 3,00						2,00 – 3,00						2,00 – 4,00	2,00 – 4,00	2,00 – 4,00
	KEMIRINGAN BAHU JALAN (%)		4,00 – 6,00						4,00 – 6,00						4,00 – 6,00	4,00 – 6,00	

(Permen PUPR No.5 Tahun 2023)



Gambar 3. 5 Panjang truk pada SNI 1725-2016.

3.4 Penentuan Model Perkerasan Fondasi Kaison

Dalam penelitian ini, digunakan beberapa variabel kontrol yaitu data yang dipertahankan nilainya untuk seluruh perlakuan agar netral pengaruhnya terhadap variabel terikat yang akan diamati dan variabel bebas yaitu data yang terus diubah-ubah untuk diamati pengaruhnya terhadap variabel terikat yang akan diamati. Beberapa hal yang menjadi variabel kontrol dan tidak diubah-ubah sebagai berikut.

1. Panjang Pelat = 20 m
2. Lebar Pelat = 8 m
3. Tebal Pelat = 0,15 m
4. Tebal cincin kaison = 0,08 m
5. Mutu beton = 23 MPa

Dimensi pelat yang digunakan berukuran 8 x 20 m. Lebar 8 m digunakan untuk menyesuaikan dengan ukuran lebar dua lajur badan jalan arteri primer tipe 8/2 T pada Persyaratan Teknis Jalan PUPR seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.2. Panjang 20 m menyesuaikan ukuran panjang kendaraan truk pada SNI 1725-2016 untuk Pembebanan Jembatan dengan ruang bebas di sekitarnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5.

Selanjutnya, variabel bebas yang terus diubah-ubah untuk melihat perilaku pelat antara lain ditunjukkan pada Tabel 3.3 sebagai berikut. Variabel bebas pada penelitian ini antara lain sebagai berikut.

1. Diameter luar fondasi kaison (D)
2. Panjang fondasi kaison (L)
3. Jarak antar cakar
4. Lokasi pembebanan

Variabel terikat yang akan diamati berupa perilaku pelat dan deformasi pada pelat akibat perubahan variabel di atas. Diameter luar dan panjang fondasi diubah-ubah untuk mengetahui pengaruh penambahan diameter dan panjang terhadap penurunan. Rasio antara panjang fondasi kaison (L) dan diameter luar fondasi kaison (D) didesain agar nilainya selalu lebih besar atau sama dengan 4. Hal ini bertujuan untuk mempertahankan prinsip dan kaidah dari fondasi kaison dimana rasio ini harus lebih dari 4 ($D_f/B \geq 4$) menurut Bowles (1997).

Pemilihan nilai variasi diameter dan panjang dalam Tabel 3.3 dipilih berdasarkan pertimbangan berikut.

1. Diameter luar fondasi kaison divariasikan dalam rentang 0,5 – 0,8 m dan panjang fondasi kaison divariasikan dalam rentang 2,0 – 4,8 m dengan memperhatikan syarat nilai rasio L/D.
2. Nilai variasi panjang fondasi kaison terkecil dipilih sebesar 2,0 m dengan mempertimbangkan panjang kedalaman cakar yang disarankan oleh Sedyatmo dalam desain pertama cakar ayam Sedyatmo sebesar 2,0 m.
3. Nilai variasi diameter luar terkecil dipilih sebesar 0,5 m dengan mempertimbangkan syarat $D = \frac{1}{4} L$ untuk fondasi kaison dimana L terkecil untuk penelitian ini dipilih sebesar 2,0 m.
4. Nilai variasi panjang fondasi terbesar dipilih sebesar 4,8 m dengan mempertimbangkan besarnya diameter maksimum yang mampu disusun di dalam pelat berdimensi 20 x 8 m.

Tabel 3. 3 Model Penelitian dengan Parameter D, d, dan L yang Berbeda

Nama Model	Diameter Luar (D)	Diameter Dalam (d)	Panjang Fondasi (L)
A-01	0,5 m	0,34 m	2,0 m
A-02	0,5 m	0,34 m	2,5 m
A-03	0,5 m	0,34 m	3,0 m
B-01	0,6 m	0,44 m	2,4 m
B-02	0,6 m	0,44 m	3,0 m
B-03	0,6 m	0,44 m	3,6 m
C-01	0,7 m	0,54 m	2,8 m
C-02	0,7 m	0,54 m	3,5 m
C-03	0,7 m	0,54 m	4,2 m
D-01	0,8 m	0,64 m	3,2 m
D-02	0,8 m	0,64 m	4,0 m
D-03	0,8 m	0,64 m	4,8 m

Untuk mengetahui pengaruh jarak antar cakar terhadap penurunan, maka seluruh model di atas akan dimodelkan ke dalam beberapa konfigurasi susunan cakar sebagai berikut.

1. Konfigurasi I

Jarak as pusat X	= 2,0 m
Jarak as pusat Y	= 2,0 m
Jarak as tepi X	= 2,0 m
Jarak as tepi Y	= 2,0 m
Jumlah konfigurasi	= 3 x 8

2. Konfigurasi II

Jarak as pusat X	= 2,5 m
Jarak as pusat Y	= 2,5 m
Jarak as tepi X	= 1,25 m
Jarak as tepi Y	= 1,50 m
Jumlah konfigurasi	= 3 x 7

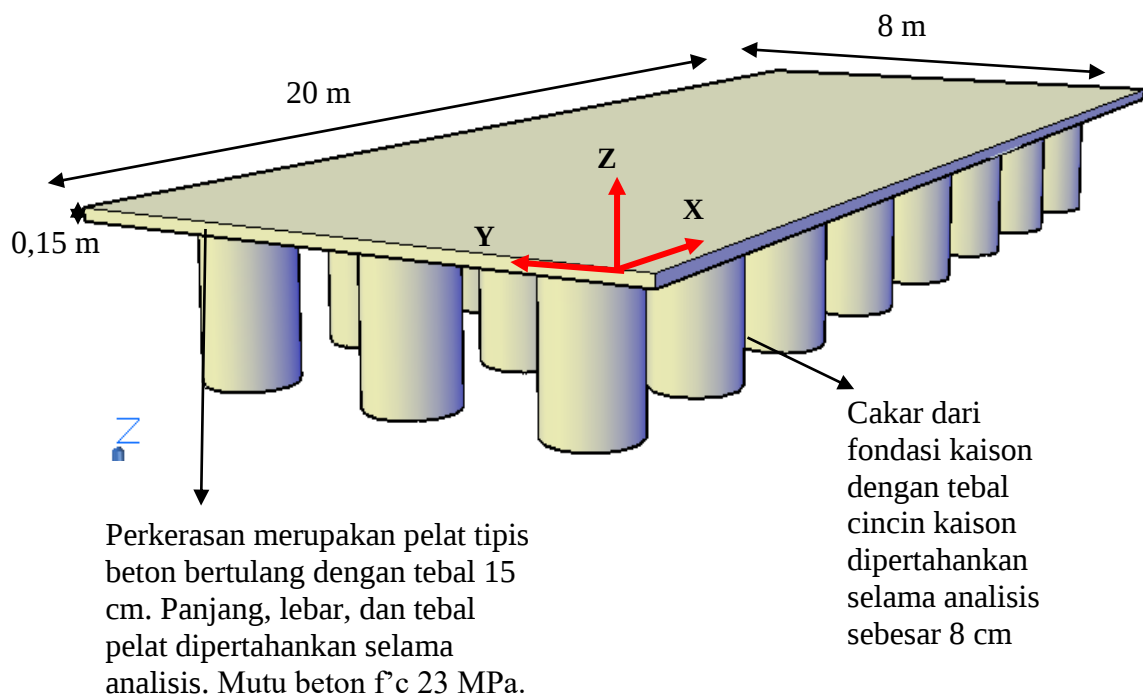
3. Konfigurasi III

Jarak as pusat X	= 3,0 m
------------------	---------

Jarak as pusat Y = 3,0 m
 Jarak as tepi X = 1,0 m
 Jarak as tepi Y = 1,0 m
 Jumlah konfigurasi = 3 x 6

Lendutan yang terjadi pada pelat berdasarkan hasil analisis terhadap model-model di atas kemudian dibandingkan dengan model perkerasan cakar ayam Sedyatmo yang telah dijelaskan pada subbab 3.3. Keseluruhan model akan dianggap mengikuti model keruntuhan *linear elastic*. Kesimpulan kinerja mengacu pada besarnya lendutan di setiap posisi pembebanan yang dijelaskan lebih rinci pada subbab 3.5. Ilustrasi tiap model digambarkan pada Gambar 3.6, 3.7, dan 3.8 berikut.

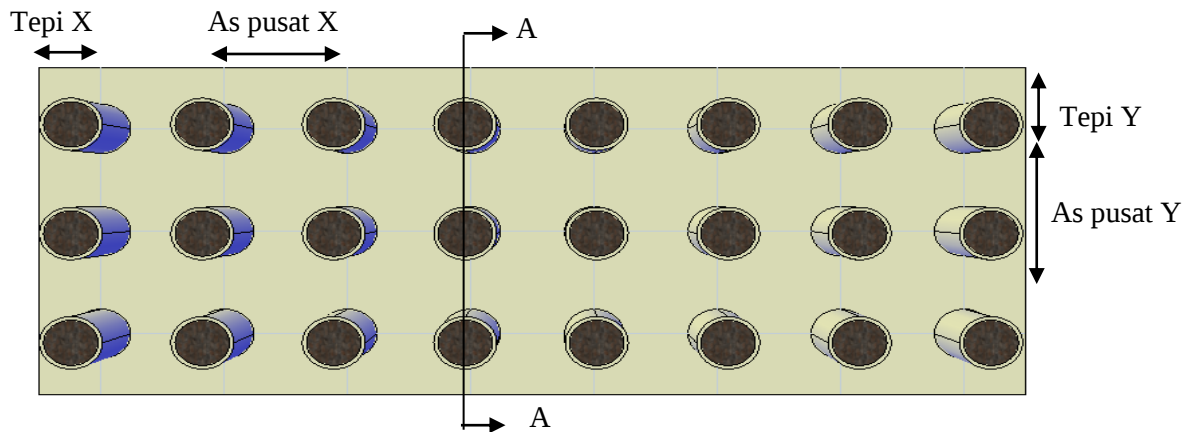
Variabel kontrol = Panjang, lebar, tebal pelat, tebal cincin kaison



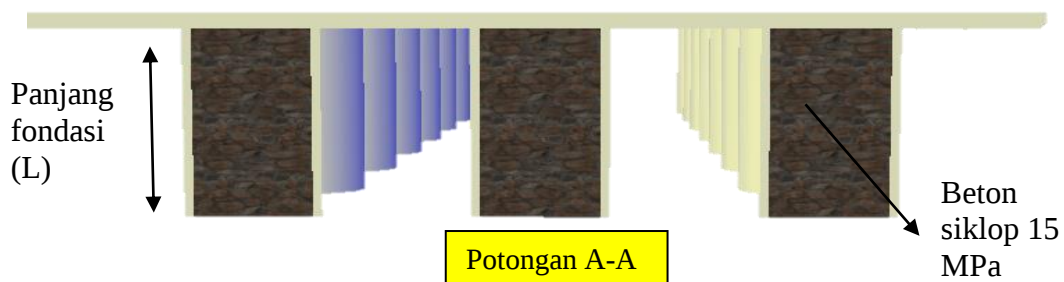
Gambar 3. 6 Tampak tiga dimensi perkerasan dengan fondasi kaison.

Variabel bebas = Jarak antar cakar

Jarak as pusat X dan Y serta jarak as tepi X dan Y terus diubah-ubah mengikuti konfigurasi cakar yang telah direncanakan yaitu konfigurasi I, II, dan III seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.

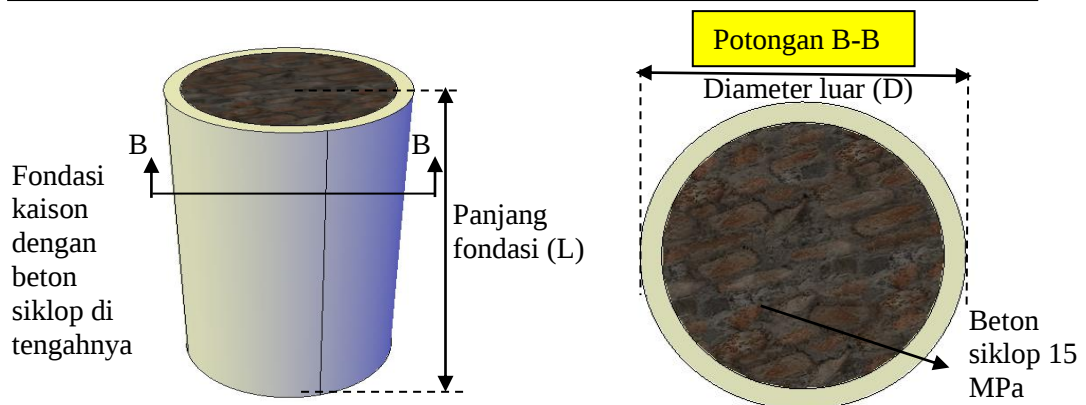


Gambar 3. 7 Tampak atas perkerasan dengan fondasi kaison.



Variabel bebas = Diameter fondasi (D) dan panjang fondasi (L)

Diameter (D) dan panjang fondasi kaison (L) divariasikan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap penurunan. Variasi D dan L dijelaskan pada Tabel 3.3



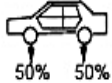
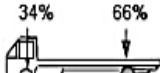
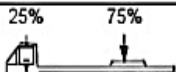
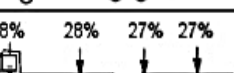
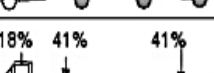
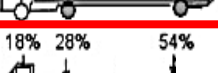
Gambar 3. 8 Potongan melintang perkerasan dan fondasi kaison.

3.5 Pembebanan

Aturan pembebanan yang digunakan mengacu pada Manual Perkerasan Jalan dengan Alat Benkelman Beam No.01/MN/BM/83 pada Gambar 3.9. Panduan ini memberikan acuan distribusi beban kendaraan yang dapat digunakan untuk mendesain perkerasan jalan. Dalam panduan ini, berbagai jenis kendaraan dikelompokkan berdasarkan konfigurasi sumbunya.

Konfigurasi ini dinyatakan dalam sebuah kode konfigurasi. Kode 1 menyatakan sumbu kendaraan roda tunggal. Kode 2 menyatakan sumbu kendaraan roda ganda. Tanda koma (,) digunakan untuk memisahkan antara sumbu depan dan belakang kendaraan. Kode L (*light*) digunakan untuk truk ringan dan kode H (*heavy*) untuk truk berat. Tanda plus (+) menyatakan terdapat kereta tambahan yang digandeng dengan kendaraan utama. Tanda minus (-) menyatakan kereta tambahan yang digandeng dengan sistem hidrolik. Pola pembacaan ini seterusnya diterapkan untuk konfigurasi lainnya. Dalam panduan ini, juga dijelaskan mengenai berat kosong kendaraan, berat muatan maksimum kendaraan, dan berat total kendaraan bersama muatan,

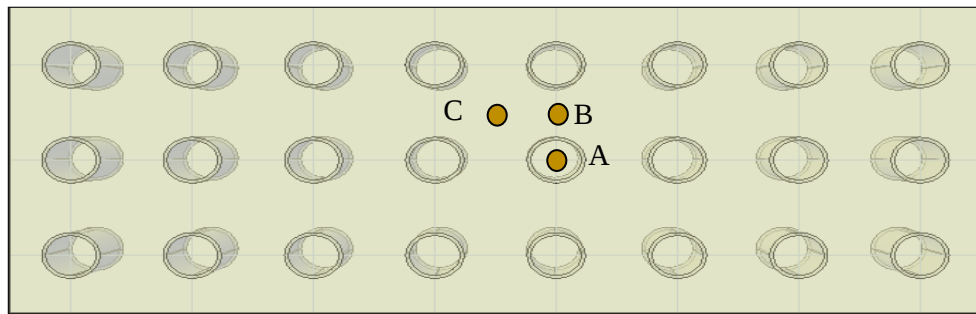
Pembebanan yang dipilih untuk penelitian merupakan muatan sumbu terberat pada truk trailer muatan terbesar menurut Manual Perkerasan Jalan dengan Alat Benkelman Beam No.01/MN/BM/83 yaitu pada truk trailer konfigurasi 1,2 – 2,2. Truk ini memiliki satu sumbu roda tunggal (1) pada sumbu depan dan satu sumbu roda ganda (2) pada sumbu belakang kendaraan yang memiliki kereta tambahan sistem hidrolik dengan sumbu roda ganda (2) pada bagian depan dan belakang. Berat total maksimum truk ini mencapai 42 ton dan paling besar dibandingkan berat kendaraan lainnya. Berat kosong truk tersebut mencapai 10 ton dan berat maksimum beban yang mampu ditampung sebesar 32 ton. Muatan sumbu terberat terletak pada kereta hidrolik sebesar 54% dari berat total yaitu 22,68 ton. Berat beban 22,68 ton atau setara dengan 226,8 kN ini selanjutnya akan dipakai untuk analisis. Pembebanan diterapkan secara monotonik.

KONFIGURASI SUMBU & TIPE	BERAT KOSONG (ton)	BEBAN MUATAN MAKSIMUM (ton)	BERAT TOTAL MAKSIMUM (ton)	UE 18 KSAL KOSONG	UE 18 KSAL MAKSIMUM	
1,1 HP	1,5	0,5	2,0	0,0001	0,0005	
1,2 BUS	3	6	9	0,0037	0,3006	
1,2L TRUK	2,3	6	8,3	0,0013	0,2174	
1,2H TRUK	4,2	14	18,2	0,0143	5,0264	
1,2,2 TRUK	5	20	25	0,0044	2,7416	
1,2+2,2 TRAILER	6,4	25	31,4	0,0085	3,9083	
1,2-2 TRAILER	6,2	20	26,2	0,0192	6,1179	
1,2-2,2 TRAILER	10	32	42	0,0327	10,183	

(Sumber: Manual Perkerasan Jalan dengan alat Benkelman beam No. 01/MN/BM/83).

Gambar 3. 9 Aturan pembebanan Manual Perkerasan Jalan dengan Alat Benkelman beam no. 01/MN/BM/93).

Beban tunggal 22,68 ton kemudian diletakkan pada tiga kondisi pembebanan untuk seluruh model cakar ayam Sedyatmo dan perkerasan fondasi kaison. Detail posisi pembebanan dapat dilihat pada Gambar 3.10. Posisi A berada di pusat fondasi kaison. Posisi B berada di antara kedua fondasi atau terletak di tengah-tengah as yang memisahkan fondasi kaison pada jarak X atau Y nya. Posisi C berada di antara empat fondasi. Posisi A dianggap mewakili perilaku seluruh pelat ketika beban melewati pusat fondasi. Posisi B dianggap mewakili perilaku pelat ketika beban berada di antara dua fondasi. Posisi C dianggap mewakili perilaku pelat ketika beban berada di antara empat fondasi.



Gambar 3. 10 Posisi pembebanan pada pelat.

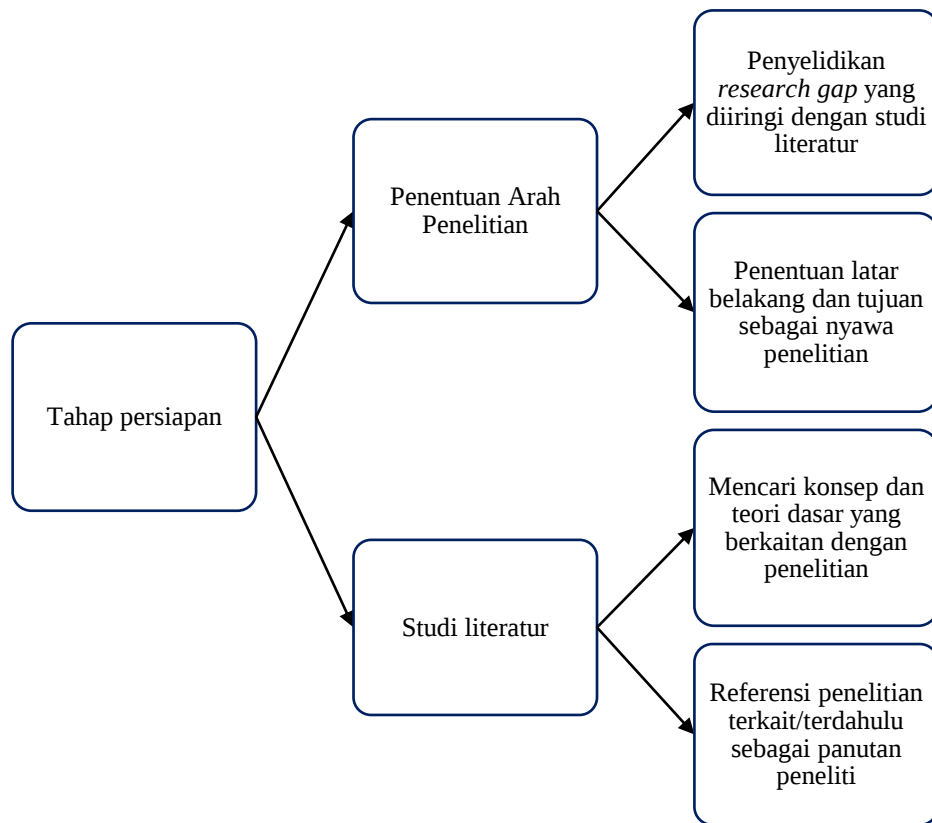
3.6 Tahapan Analisis

Rancangan alur penelitian yang akan dilaksanakan akan diuraikan sebagai berikut.

3.6.1 Tahap Persiapan

Secara garis besar, terdapat dua hal utama yang dilakukan dalam tahap persiapan meliputi **tahap penentuan arah penelitian** dan **tahap studi literatur**. Tahap penentuan arah penelitian merupakan proses menentukan latar belakang dan tujuan penelitian. Kedua hal ini menjadi penting karena menjadi nyawa dari jalannya penelitian. Tahap ini berjalan beriringan dengan tahap studi literatur. Studi literatur adalah proses pengumpulan, analisis, dan interpretasi literatur yang relevan dengan suatu topik tertentu. Studi literatur dapat dilakukan untuk berbagai tujuan, seperti menemukan informasi baru, memahami teori dan konsep yang relevan, menentukan metodologi penelitian yang tepat, menentukan kerangka teoritis penelitian, dan mengevaluasi hasil penelitian sebelumnya. Melalui studi literatur inilah ditemukan *research gap* yang dapat menjadi suatu kebaruan dalam penelitian yang akan dilakukan. Dalam hal ini, ditemukan adanya potensi penggunaan fondasi kaison untuk cakar pelat perkerasan sebagai alternatif sistem perkerasan kaku di atas tanah lunak. Hal ini kemudian menjadi latar belakang dan arah penelitian berjalan. Studi literatur juga membantu

memantapkan pemahaman peneliti terkait teori dasar dan konsep yang berkaitan dengan penelitian. Dalam hal ini, konsep mekanika tanah menjadi penting untuk dipahami. Setelah seluruh tahapan selesai, maka tujuan penelitian dan studi literatur dituangkan dalam bentuk tulisan yang terdapat pada Bab I dan Bab II skripsi ini.



Gambar 3. 11 *Mind mapping* tahap persiapan penelitian.

3.6.2 Tahap Pengumpulan Data

Tahap pengumpulan data dilakukan ketika tahap persiapan telah selesai yang mencakup objek mana yang akan dimodelkan, kemudian dilakukan pengumpulan data terhadap objek tersebut. Secara garis besar, terdapat dua data yang perlu diperoleh sebelum penelitian meliputi data tanah lunak dan data teknis cakar ayam Sedyatmo.

1. Data tanah lunak

Data tanah lunak yang digunakan merupakan data sekunder yang diperoleh dari data tanah yang digunakan oleh Sedyatmo dan

Suhendro saat melakukan pengujian cakar ayam Sedyatmo dan cakar ayam modifikasi *full scale* 1:1 di atas tanah lempung lunak Waru, Surabaya. Data ini tertera dalam penelitian Puri (2015) dan telah dijelaskan lebih rinci pada subbab 3.1.

2. Data teknis cakar ayam Sedyatmo

Data teknis cakar ayam Sedyatmo diperlukan sebagai bahan pembanding. Pada akhir penelitian, analisis kinerja rancangan sistem perkerasan pelat dengan fondasi kaison sebagai paku perkerasan akan dibandingkan dengan pelat cakar ayam Sedyatmo untuk melihat apakah kinerja pelat mendekati atau mungkin lebih baik dari cakar ayam Sedyatmo. Data teknis rinci mengenai cakar ayam Sedyatmo yang akan dijadikan sebagai bahan pembanding akan dijelaskan lebih rinci pada subbab 3.3.

3.6.3 Tahap Pemodelan 3D

Setelah seluruh data terkumpulkan, maka sistem akan dimodelkan secara tiga dimensi pada Plaxis 3D. Proses pemodelan meliputi pemodelan profil tanah lunak, cakar ayam Sedyatmo, perkerasan dengan fondasi kaison, serta pembebanan sebagai berikut.

1. Pengaturan lembar kerja

Tahap ini dilakukan agar model yang dibuat sesuai dengan unit satuan standar yang berlaku. Pengaturan lembar kerja meliputi penentuan nama *file* dan logo untuk kop kerja pada *tab project*, serta penentuan satuan panjang, gaya, waktu, penentuan nilai γ air, dan nilai absis ordinat wilayah kerja arah x dan y pada *tab model*. Dalam penelitian ini, digunakan satuan standar untuk panjang yaitu meter serta satuan standar untuk gaya dan beban yaitu kN. Besaran berat volume air untuk muka air tanah diambil nilai *default* sebesar 10 kN/m^3 . Nilai $x_{\max}$ dan $x_{\min}$ dimasukkan sesuai panjang dimensi pelat yang dimodelkan yaitu 20 m. Nilai $y_{\max}$ dan $y_{\min}$ dimasukkan sesuai lebar dimensi pelat yang dimodelkan yaitu 8 m.

Project properties

Project Model Cloud services

PLAXIS® 3D
CONNECT Edition

Project

Title: Skripsi Ryan

Company: Ryan Natanael Uswadi

Directory:

File name:

Comments:

Company logo:

☐ Set as default

Next OK Cancel

Gambar 3. 12 *Tab project* pada pengaturan lembar kerja.

Project properties

Project Model Cloud services

Type: Full

Elements: 10-Noded

Units:

Length: m

Force: kN

Time: day

Stress: kN/m²

Weight: kN/m³

General:

Gravity: 1,0 g (-Z direction)

Earth gravity: 9,810 m/s²

γ water: 10,00 kN/m³

Contour:

X min: 0,000 m

X max: 8,000 m

Y min: 0,000 m

Y max: 20 m

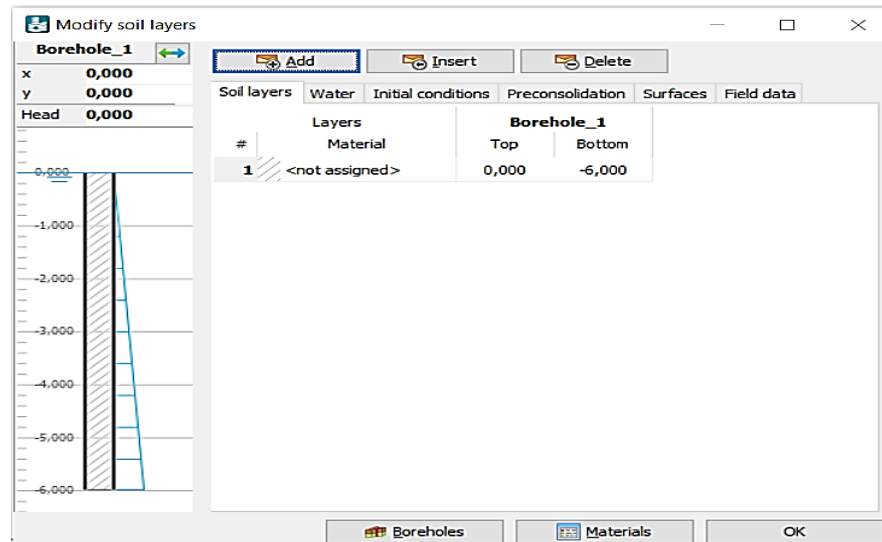
☐ Set as default

Next OK Cancel

Gambar 3. 13 *Tab model* pada pengaturan lembar kerja.

2. Pemodelan tanah

Tahap pemodelan tanah dilakukan dengan cara memodelkan geometri tanah lunak ke dalam Plaxis 3D dan mengatur kedalaman tanah. Proses ini dilakukan pada *tab soil* pada menu *input borehole*. Pada proses ini, tinggi muka air tanah juga didefinisikan. Tanah lunak dimodelkan sedalam 6 m dan muka air tanah terletak 2 m dari permukaan tanah.



Gambar 3. 14 Menu *borehole* untuk pemodelan geometri tanah.

3. *Input* parameter tanah

Tahap ini merupakan tahap pendefinisian tanah lunak berdasarkan parameter tanah yang telah diperoleh pada Tabel 3.1. Beberapa data yang perlu di-*input* meliputi data berikut.

a. *Tab general*

- 1) *Identification* merupakan nama material yang diatur. Dalam penelitian ini, material tanah disebut “Tanah”. Warna material diatur untuk membedakannya dengan warna material lainnya.
- 2) *Soil model* merupakan model keruntuhan material. Dalam penelitian ini, tanah dimodelkan dengan keruntuhan Mohr-Coulomb.
- 3) *Drainage type* merupakan perilaku terdrainase tanah. Dalam penelitian ini, dipilih tipe tak terdrainase B (*undrained B*) karena nilai sudut gesek dan sudut dilatansi adalah 0 derajat. Pada tipe *undrained B*, analisis menggunakan nilai tegangan efektif dengan parameter kekuatan $c = c_u$, $\varphi = 0$, dan $\psi = 0$ (Plaxis 3D, 2023a).
- 4) *Unit weight* merupakan berat volume tanah pada keadaan *saturated* (γ_{sat}) dan *unsaturated* (γ_{unsat}) dalam kN/m^3

Soil - Mohr-Coulomb - Tanah

General Mechanical Groundwater Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		Tanah
Soil model		Mohr-Coulomb
Drainage type		Undrained B
Colour		RGB 237, 164, 53
Comments		
Unit weights		
γ_{unsat}	kN/m ³	16,00
γ_{sat}	kN/m ³	17,00
Void ratio		
e_{init}		0,5000
n_{init}		0,3333

Gambar 3. 15 *Tab general* pada *input* parameter tanah.

b. *Tab mechanical*

- 1) E'_{ref} merupakan modulus *young* tanah dalam kN/m².
- 2) ν (nu) merupakan nilai *poisson ratio* tanah.
- 3) S_u ref merupakan nilai kuat geser tak terdrainase Dalam penelitian ini, dapat disamakan sebagai kohesi tanah(Plaxis 3D, 2023a). Parameter lainnya secara otomatis terhitung oleh Plaxis 3D.

Soil - Mohr-Coulomb - Tanah

General Mechanical Groundwater Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Stiffness		
E'_{ref}	kN/m ²	4000
ν (nu)		0,3500
Alternatives		
G_{ref}	kN/m ²	1481
E'_{oed}	kN/m ²	6420
Depth-dependency		
E'_{inc}	kN/m ² /m	0,000
z_{ref}	m	0,000
Wave velocities		
V_s	m/s	30,14
V_p	m/s	62,74
Strength		
Shear		
$s_{u,\text{ref}}$	kN/m ²	20,00
ϕ_u (phi)	°	0,000
ψ (psi)	°	0,000
Depth-dependency		
$s_{u,\text{inc}}$	kN/m ² /m	0,000
z_{ref}	m	0,000
Tension		
Tension cut-off		☒

Next OK Cancel

Gambar 3. 16 *Tab mechanical* pada *input* parameter tanah.

c. *Tab groundwater*

Bagian ini merupakan tahapan pendefinisian karakteristik aliran air tanah dan permeabilitas tanah. Pada penelitian ini, tidak ada konsolidasi yang akan dipertimbangkan. Akibatnya, permeabilitas tanah tidak akan mempengaruhi dan bagian ini dapat dilewatkan.

d. *Tab interfaces*

Bagian ini merupakan tahapan pendefinisian interaksi antar muka untuk menerapkan interaksi struktur-tanah (*soil-structure interaction*) pada struktur. Hal yang perlu diatur meliputi.

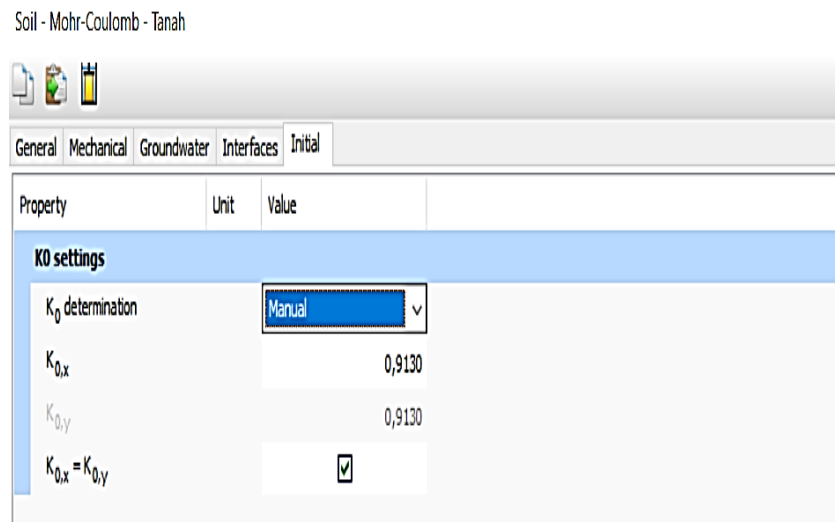
- 1) *Stiffness determination* atau penentuan kekakuan *interface* dipilih *derived* atau diturunkan dari parameter tanah.
- 2) *Strength determination* adalah penentuan kekuatan dan perilaku tanah disekitar struktur. Secara teori, bagian antarmuka tentu menjadi bagian paling lemah sehingga kekuatan pada bagian antarmuka harus direduksi. Oleh karena itu dalam penelitian ini, dipilih *manual* dengan nilai reduksi R_{inter} tanah sesuai pada Tabel 3.1

Property	Unit	Value
Stiffness		
Stiffness determination		Derived
Strength		
Strength determination		Manual
R_{inter}		0,8000
Consider gap closure		☒
Groundwater		
Cross permeability		Impermeable
Drainage conductivity $1, dk$	$m^3/day/m$	0,000
Drainage conductivity $2, dk$	$m^3/day/m$	0,000

Gambar 3. 17 *Tab interface* pada *input* parameter tanah.

e. *Tab initial*

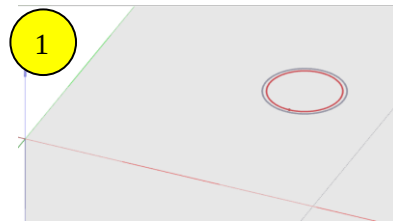
Bagian ini berisi parameter K_0 atau koefisien tekanan tanah saat diam untuk menghasilkan tegangan awal tanah saat belum dibebani. Nilai K_0 untuk arah x dan arah y diasumsikan sama. Nilai ini di-*input* berdasarkan data parameter tanah pada Tabel 3.1.



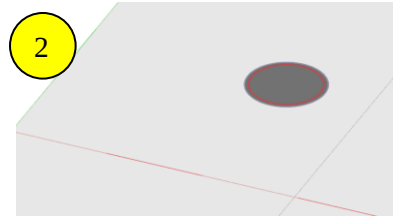
Gambar 3. 18 *Tab initial* pada *input* parameter tanah.

4. Pemodelan sistem perkerasan

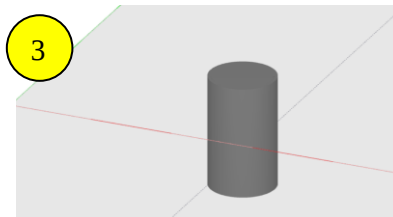
Tahap pemodelan struktur dilakukan dengan cara memodelkan perkerasan yang telah direncanakan pada subbab 3.3 dan 3.4 ke dalam Plaxis 3D. Proses ini dilakukan pada *tab structure*. Secara ringkas, tahapan dalam pemodelan struktur dimulai dari pemodelan cakar perkerasan atau fondasi kaison untuk perkerasan dengan fondasi kaison, pembuatan *interface* pada sekeliling cakar dan di bawah pelat perkerasan untuk mengaktifkan analisis *soil-interaction* antara tanah struktur, serta membuat pelat perkerasan sesuai dengan tebal dan dimensi yang telah direncanakan. Tahapan detail pemodelan struktur perkerasan cakar ayam Sedyatmo dan struktur perkerasan cakar dengan fondasi kaison dijelaskan lebih detail pada Gambar 3.19 sebagai berikut.



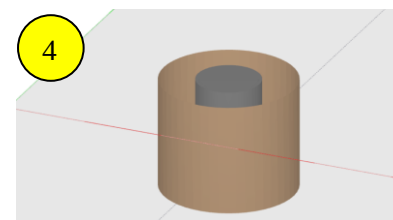
Membuat *polycurve* luar untuk cincin dan *polycurve* dalam untuk siklop pada kaison dan tanah pada cakar ayam Sedyatmo.



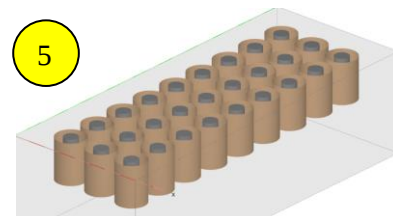
Kedua *polycurve* diubah menjadi elemen *surface*



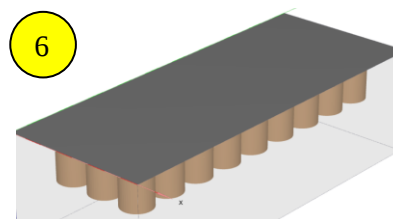
Melakukan *extrude* pada elemen *surface* sehingga terbentuk elemen bervolume. Setelah cakar terbentuk, *polycurve* dan *surface* akan dihapus sehingga menyisakan elemen volume cakar saja



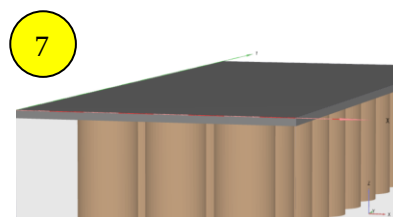
Menambahkan elemen *interface* disekeliling cakar untuk mengaktifkan *soil-structure interaction* di antara tanah dan struktur.



Memperbanyak elemen cakar dengan perintah *array*.



Membuat pelat perkerasan dengan elemen *surface*.



Melakukan *extrude* pada elemen *surface* sehingga terbentuk pelat bervolume. Setelah pelat terbentuk, *surface* dihapus sehingga menyisakan elemen volume pelat saja.

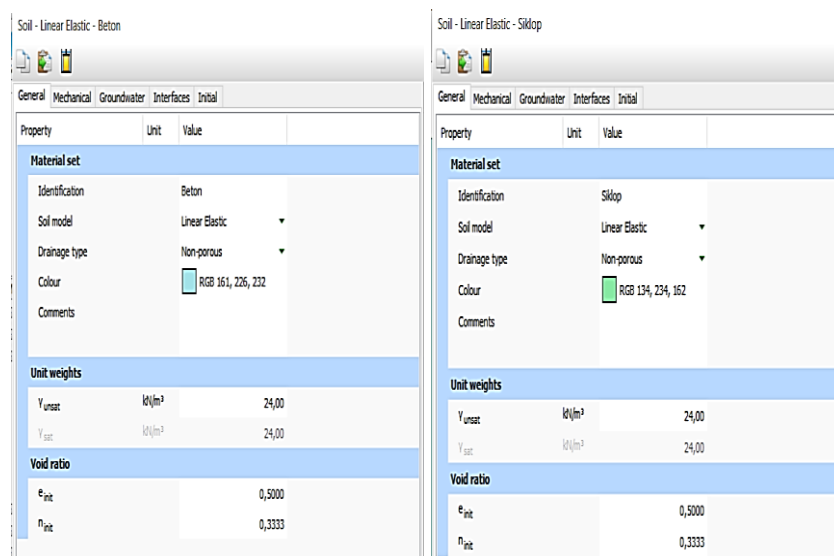
Gambar 3. 19 Tahapan proses pembuatan model perkerasan.

5. Input parameter struktur

Tahap ini merupakan tahap pendefinisian struktur beton berdasarkan parameter yang telah ditentukan. Beberapa data yang perlu di-input meliputi data berikut.

a. Tab general

- 1) *Identification* merupakan nama material. Dalam penelitian ini, beton disebut “Beton” dan siklop disebut “Siklop”.
- 2) *Soil model* merupakan model keruntuhan material. Dalam penelitian ini, beton dan siklop dimodelkan sebagai *linear elastic*.
- 3) *Drainage type* merupakan perilaku terdrainase beton. Dalam penelitian ini, dipilih tipe *non-porous* untuk beton (Plaxis 3D, 2023a).
- 4) *Unit weight* merupakan berat volume beton dalam kN/m^3 .



Gambar 3. 20 Tab general pada input parameter beton (kiri) dan siklop (kanan).

b. Tab mechanical

- 1) E'_{ref} merupakan modulus *young* tanah dalam kN/m^2 . Untuk beton, nilai modulus *young* merupakan 4700 kali dari akar kuadrat nilai kuat tekan beton.

2) ν (nu) merupakan nilai *poisson ratio* tanah dan didefinisikan sebagai perbandingan regangan arah vertikal dan horizontal. Parameter lainnya akan otomatis terhitung oleh Plaxis.

Property	Unit	Value
Stiffness		
E_{ref}	kN/m ²	22,54E6
ν (nu)		0,1500
Alternatives		
G_{ref}	kN/m ²	9,800E6
E_{sed}	kN/m ²	23,80E6
Depth-dependency		
E_{inc}	kN/m ² /m	0,000
z_{ref}	m	0,000
Wave velocities		
V_s	m/s	2001
V_p	m/s	3119

Property	Unit	Value
Stiffness		
E_{ref}	kN/m ²	19,20E6
ν (nu)		0,1500
Alternatives		
G_{ref}	kN/m ²	7,914E6
E_{sed}	kN/m ²	19,20E6
Depth-dependency		
E_{inc}	kN/m ² /m	0,000
z_{ref}	m	0,000
Wave velocities		
V_s	m/s	1799
V_p	m/s	2803

Gambar 3. 21 *Tab mechanical* pada *input* parameter beton (kiri) dan siklop (kanan).

c. *Tab groundwater*

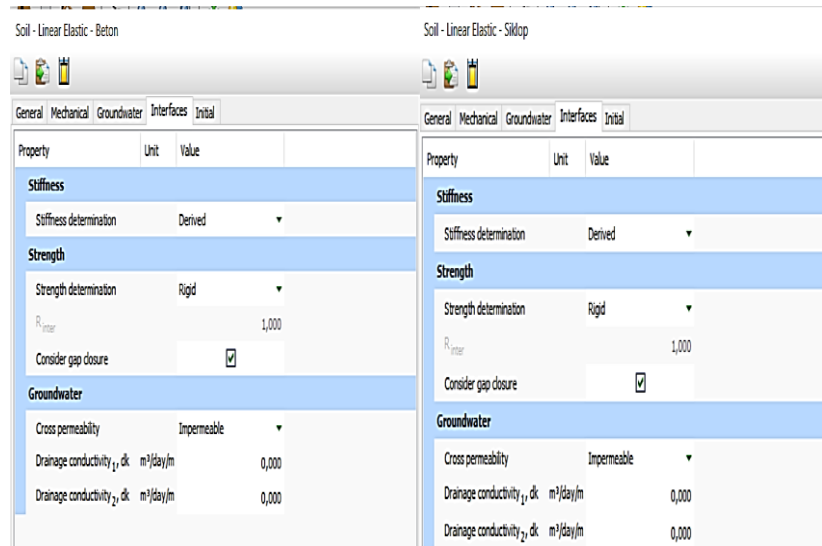
Bagian ini merupakan tahapan pendefinisian karakteristik aliran air dalam material. Material beton merupakan material *non porous* sehingga bagian ini dapat dilewatkan.

d. *Tab interfaces*

Sifat-sifat elemen antarmuka terkait dengan parameter model tanah dari tanah di sekitarnya. Parameter yang diperlukan untuk mendapatkan properti antarmuka didefinisikan dalam *tabsheet interfaces*. Parameter ini bergantung pada model yang dipilih untuk mewakili perilaku tanah di sekitarnya. Hal yang perlu di-*input* untuk mendefinisikan karakteristik *interface* yaitu:

- 1) *Stiffness determination* atau penentuan kekakuan *interface* dipilih *derived* atau diturunkan dari parameter beton.
- 2) *Strength determination* dipilih *rigid* untuk material beton.

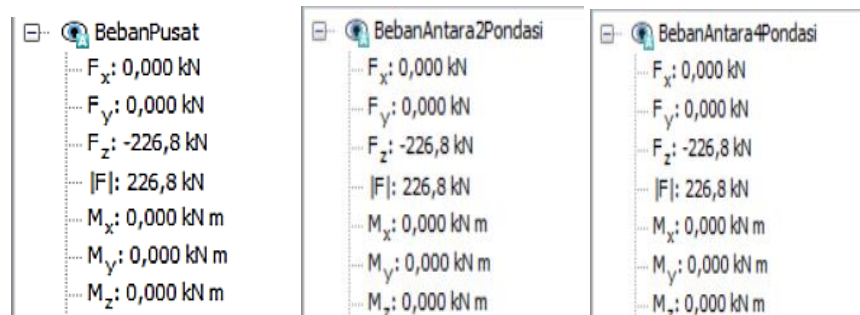
- 3) Opsi *consider gap closure* perlu diceklis untuk memulihkan kontak antara struktur dan tanah sebelum tegangan tekan dapat berkembang.



Gambar 3. 22 Tab interface pada input parameter beton (kiri) dan siklop (kanan).

6. Pembebanan

Pembebanan yang dilakukan adalah pembebanan monotomik muatan sumbu tunggal (MST) terberat mengacu pada Manual Perkerasan Jalan dengan Alat Benkelman Beam No.01/MN/BM/83. Pembebanan dilakukan pada tiga lokasi yaitu di pusat fondasi kaison, di antara dua fondasi kaison, dan di antara empat fondasi kaison. Rincian pembebanan dapat dilihat pada subbab 3.5.



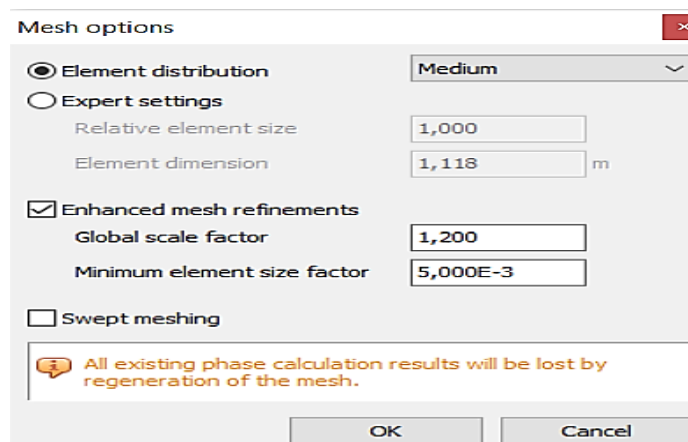
Gambar 3. 23 Tiga variasi posisi pembebanan pada model.

3.6.4 Checking Pemodelan

Sebelum melakukan proses *running*, maka seluruh pemodelan akan dilakukan *cross check* terlebih dahulu untuk memastikan tidak ada *error* atau kesalahan dalam pemodelan. Hal ini untuk mencegah proses keluaran hasil yang tidak valid akibat kesalahan pemodelan.

3.6.5 Meshing

Setelah proses pemodelan geometri selesai, maka model perlu didiskritisasi menjadi beberapa elemen hingga agar dapat dianalisis. Proses ini disebut dengan *meshing*. Untuk mendapatkan perhitungan yang lancar dan akurat, elemen *mesh* harus memenuhi beberapa kriteria. Elemen-elemennya harus cukup kecil, terutama di area-area yang diperkirakan dapat terjadi perubahan tegangan atau regangan yang signifikan selama analisis. Namun, bukan berarti keseluruhan model harus dibuat elemen *mesh* yang sangat kecil karena hal ini akan menyebabkan waktu perhitungan yang sangat lama. Oleh karena itu, distribusi ukuran elemen *medium* disarankan secara *default* oleh Plaxis 3D sebagai bentuk *meshing* yang optimal. Penghalusan *meshing* dilakukan secara manual pada daerah yang memerlukan tingkat *mesh* lebih akurat



Gambar 3. 24 Pengaturan *meshing* model sebelum analisis.

3.6.6 *Running Analysis*

Tahapan *running analysis* pada Plaxis 3D dilakukan secara *staged construction* (konstruksi bertahap) pada tiga posisi pembebanan untuk setiap model perkerasan dengan fondasi kaison yang diatur pada subbab 3.4. Selanjutnya, hal yang sama juga diterapkan untuk perkerasan cakar ayam Sedyatmo yang telah diatur pada subbab 3.3 dan dibandingkan kinerjanya dengan fondasi kaison. Secara ringkas, tahapan *running* untuk setiap model sebagai berikut.

1. *Initial phase* sebagai tahap awal Plaxis 3D untuk menganalisis tegangan awal tanah dan kondisi awal tanah sebelum dibebani. *Calculation type* yang dipilih merupakan *K0 procedure*. Tipe perhitungan ini dipilih karena permukaan geometri tanah dianggap horizontal untuk seluruh bagian tanah dan muka air tanah sejajar dengan permukaan. Pada asumsi seperti ini, manual Plaxis 3D menyarankan analisis tegangan awal dengan *K0 procedure* (Plaxis 3D, 2023b).
2. P Pusat adalah tahap analisis saat beban berada di pusat kaison/cakar.
3. P Antara adalah tahap analisis saat beban berada di antara dua fondasi/cakar.
4. P Tengah adalah tahap analisis saat beban berada di antara empat fondasi/cakar.

Analisis pada fase P Pusat, P Antara, dan P Tengah menggunakan *calculation type* berupa *plastic*. Metode ini digunakan untuk melakukan analisis deformasi elastis-plastis yang tidak perlu memperhitungkan perubahan tekanan pori dengan waktu (Plaxis 3D, 2023b). Model *pore water pressure* yang dipilih adalah *phreatic*. Perhitungan penurunan selalu dipilih *reset displacement to zero* pada setiap tahapannya. Tampilan menu sebelum *running* ditampilkan pada Gambar 3.25.

ID	Calculation t...	Loading type...	Pore pressur...	Time interval	Estimated en...	Ignore undr...	Reset displa...	Updated me...	Max steps (D)
Initial phase [InitialPhase]	K0 procedure	Staged construction	Phreatic	0,000 day	0,000 day	☒	☐	☐	1000
P Pusat [Phase_1]	Plastic	Staged construction	Phreatic	0,000 day	0,000 day	☐	☒	☐	1000
P Antara [Phase_2]	Plastic	Staged construction	Phreatic	0,000 day	0,000 day	☐	☒	☐	1000
P Tengah [Phase_3]	Plastic	Staged construction	Phreatic	0,000 day	0,000 day	☐	☒	☐	1000

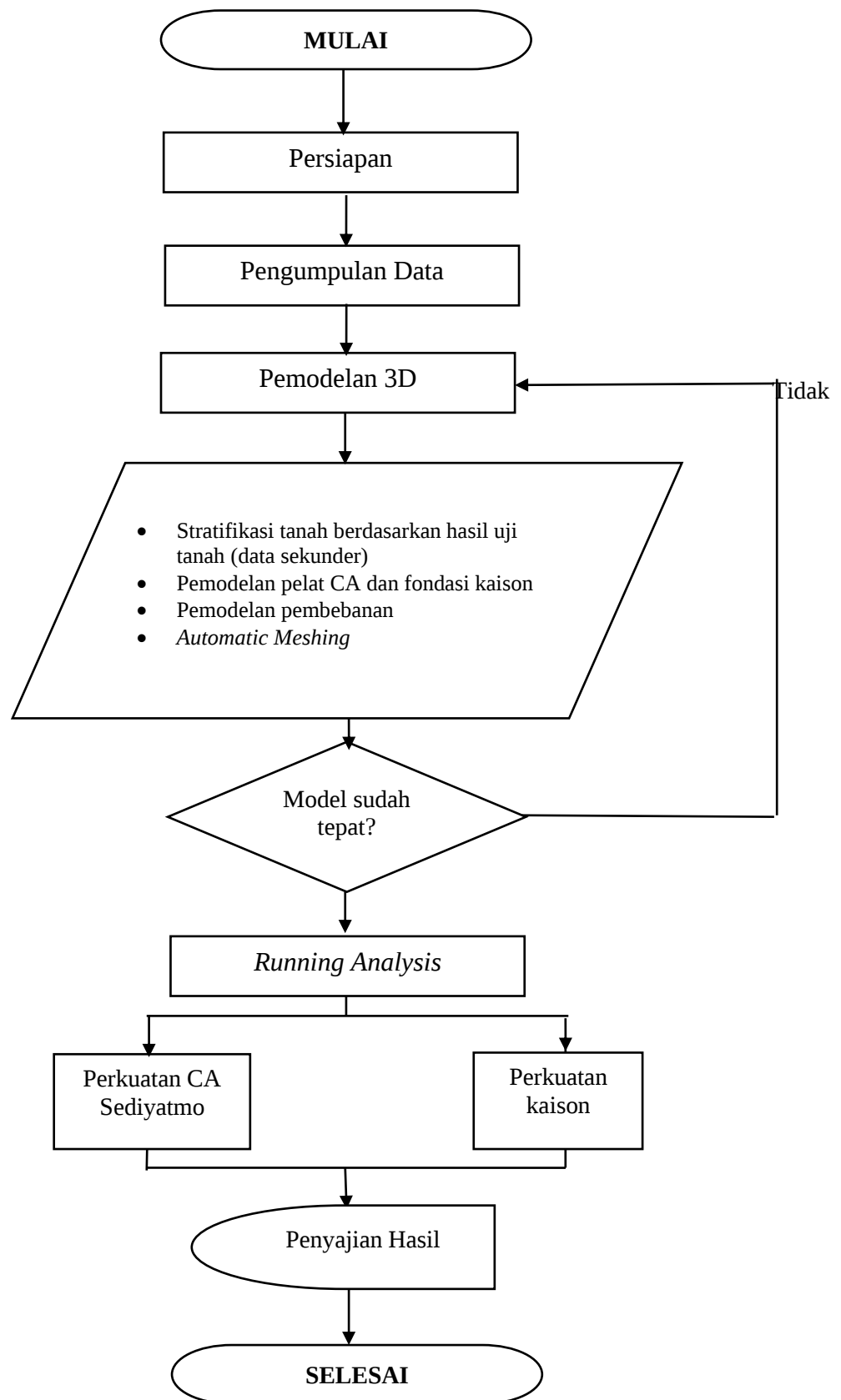
Gambar 3. 25 Menu *stage construction* sebelum *running analysis*.

3.6.7 Penyajian Hasil

Setelah didapat hasil dari pemodelan yang telah dilakukan kemudian dilakukan pengolahan data yaitu membandingkan hasil penurunan pada pelat dengan perkuatan cakar ayam Sedyatmo dan perkuatan dengan fondasi kaison. Penyajian hasil dilakukan dalam bentuk grafik yang merepresentasikan hal berikut.

- Penurunan di sepanjang pelat dalam arah memanjang pada cakar ayam Sedyatmo.
- Penurunan di sepanjang pelat dalam arah melintang pada cakar ayam Sedyatmo.
- Penurunan di sepanjang pelat dalam arah memanjang pada model perkerasan dengan fondasi kaison.
- Penurunan di sepanjang pelat dalam arah melintang pada model perkerasan dengan fondasi kaison.
- Hubungan antara diameter (D) dan panjang kaison (L) dan penurunan maksimum pelat model kaison. Variabel D dan L saling terikat satu sama lain berdasarkan rasio L/D yang ditentukan.
- Hubungan antara jarak kaison dan penurunan maksimum pelat model kaison.
- Perbandingan kinerja antara model perkerasan fondasi kaison dengan cakar ayam Sedyatmo

Seluruh tahapan penelitian di atas direkapitulasi secara ringkas dalam diagram alir (*flowchart*) pada Gambar 3.26 sebagai berikut.



Gambar 3. 26 *Flowchart* penelitian.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil pemodelan dan analisis yang telah dilakukan antara lain sebagai berikut.

1. Meskipun terdapat beberapa model kaison yang menghasilkan nilai penurunan lebih besar atau lebih kecil dari cakar ayam Sedyatmo, kinerja model kaison sebagai alternatif cakar untuk aplikasi perkuatan perkerasan kaku di atas tanah lunak dapat dikatakan mendekati kinerja cakar ayam Sedyatmo dalam melawan penurunan karena selisih penurunannya cukup kecil dengan rata-rata perbedaan sebesar 1-4 mm untuk semua model. Beberapa hal yang mempengaruhi performa kaison dalam melawan penurunan seperti ukuran diameter dan panjang kaison, jarak antar kaison di bawah pelat, dan posisi pembebanan. Berdasarkan hasil analisis, ukuran $D > 0,7$ m dan $L > 2,8$ m sudah cukup memadai dengan jarak antar kaison 2 m. Kemudian, untuk ukuran $D > 0,7$ m dan $L > 4,2$ m sudah cukup memadai dengan jarak antar kaison 2,5 m dan ukuran $D > 0,8$ m dan $L > 4,8$ m sudah cukup memadai dengan jarak antar kaison 3 m.
2. Ukuran diameter dan kedalaman fondasi kaison mempengaruhi kemampuan model perkerasan dalam mereduksi penurunan pelat. Berdasarkan hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa peningkatan diameter (D) yang diiringi dengan peningkatan panjang kaison (L) sebesar L/D kali lipat mengakibatkan penurunan pelat berkurang dan sebaliknya. Kemudian, hasil yang lebih baik akan diberikan jika rasio L/D ditingkatkan. Kenaikan diameter dan panjang kaison meningkatkan tahanan ujung (Q_b) dan tahanan friksi (Q_s) kaison sehingga turut meningkatkan tambahan modulus *subgrade* (Δk) bagi pelat. Dampaknya

adalah daya dukung pelat meningkat dan penurunan berkurang.

3. Posisi pembebanan mempengaruhi besarnya penurunan pelat yang terjadi. Berdasarkan hasil analisis, terlihat bahwa semakin jauh posisi beban dari *center line* kaison terdekat, penurunan yang terjadi cenderung semakin besar. Kata “cenderung” mengindikasikan tidak semua model mengalami pola penurunan yang serupa, tetapi tendensi keseluruhan model mayoritas mengarah pada pola penurunan yang telah dijelaskan. Peningkatan jarak beban dari *center line* kaison terdekat membuat rotasi pada kaison berkembang ke arah menjauhi beban. Pergerakan ini menarik serat bawah pelat akibat keduanya monolit. Kekakuan pelat memberikan perlawanan akan pergerakan ini sehingga serat atas pelat bergerak ke arah berlawanan. Dampaknya, timbul lendutan dengan pola mangkuk yang dalam sehingga penurunan bertambah.
4. Jarak antar kaison mempengaruhi kemampuan model perkerasan dalam mereduksi penurunan pelat. Berdasarkan hasil analisis, terlihat bahwa semakin jauh jarak antar fondasi kaison, maka penurunan pelat yang terjadi meningkat dan sebaliknya. Peningkatan jarak antar kaison akan meningkatkan luasan zona pelat yang didukung oleh satu kaison (A_{ps}). Peningkatan ini membuat tambahan modulus *subgrade* (Δk) bagi pelat menurun. Dampaknya, daya dukung pelat menurun dan penurunan meningkat.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan penulis untuk pengembangan dan penelitian selanjutnya sebagai berikut.

1. Analisis variasi besaran pembebanan dapat dilakukan untuk mengetahui batasan maksimum beban saat perilaku pelat perkerasan masih linear.
2. Analisis terhadap pembebanan berulang (repetitif) dapat dilakukan untuk mengetahui nilai penurunan pelat perkerasan saat *loading* dan *unloading*.
3. Analisis dengan jenis tanah yang lain seperti tanah organik atau tanah rawa dapat dilakukan untuk penelitian berikutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Afriani, L., & Juansyah, Y. (2016). Pengaruh fraksi pasir dalam campuran tanah lempung terhadap nilai cbr dan indeks plastisitas untuk meningkatkan daya dukung tanah dasar. *Rekayasa: Jurnal Ilmiah Fakultas Teknik Universitas Lampung*, 20(1), 23-32.
- Aprizal, D., Iswan, & Sulistiyorini, R. (2021). Pengukuran Aktivitas Subgrade Jalan Terhadap Nilai Daya Dukung Yang Disubstitusi Material Pasir. *Jurnal Rekayasa Sipil Dan Desain*, 8(4), 703–714.
- Aspar, W. A. N., Utomo, D. P., & Hendriyawan. (2010). Alternatif Fondasi Terowongan Layang Dalam Laut Untuk Prasarana Transportasi. *Jurnal Sains Dan Teknologi Indonesia*, 12(3), 1–7.
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design* (5th ed.). McGraw-Hill Kogakusha Ltd. Tokyo. <https://search.app.goo.gl/jmwE2cZ>
- Bowles, J. E. (1984). *Physical and Geotechnical Properties of Soils* (2nd ed.). McGraw-Hill Book Company. USA
- Das, B. M. (1994). *Principles of Geotechnical Engineering Third Edition* (3rd ed.). McGraw-Hill. New York.
- Das, B. M. (1995). *Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid I Terjemahan oleh Noor Endah dan Indrasurya B. Mochtar* (1st ed.). Erlangga. Jakarta. <https://search.app.goo.gl/w58tFx8>
- Fahlefi, J., Iswan, & Karami, M. (2020). Perbaikan Tanah Dasar Jalan dengan Substitusi Material Pasir Terhadap Kemampuan Daya Dukung Tanah dengan Uji Tekan Pemadatan Modifikasi (Modified Proctor). *Jurnal Rekayasa Sipil Dan Desain*, 8(4), 637–648.
- Geotechnical Aspects of Pavements. Reference Manual/Participant Workbook. Publication No. FHWA NHI-05-037. (2006). Depart. of Transportation Federal Highway Administration. USA.
- Hardiyatmo, H. C. (2008). Sistem Pelat Terpakai (Nailed Slab) Untuk Perkuatan Pelat Beton pada Perkerasan Kaku (Rigid Pavement). *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Tepat Guna Dalam Penanganan Sarana Prasarana MPSP JTSL FT UGM*, 1–7.

- Hardiyatmo, H. C. (2014). *Perancangan Sistem Cakar Ayam Modifikasi untuk Perkerasan Jalan Raya Edisi Kedua* (2nd ed.). Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Hardiyatmo, H. C. (2019a). *Mekanika Tanah 1 Edisi Ketujuh* (7th ed.). Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Hardiyatmo, H. C. (2019b). *Perancangan Perkerasan Jalan dan Penyelidikan Tanah* (3rd ed.). Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Hardiyatmo, H. C. (2020). *Analisis dan Perancangan Fondasi II* (5th ed.). Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Hardiyatmo, H. C., & Suhendro, B. (2010). *Laporan Penelitian Program Insentif 2009 Kementrian Negara Riset dan Teknologi RI : "Perilaku Sistem Cakar Ayam Modifikasi pada Tanah Ekspansif."*
- Hobbs, N. B. (1987). A Note on The Classification of Peat. *Géotechnique*, 37(3), 405–407. <https://doi.org/10.1680/geot.1987.37.3.405>
- Ikbar, F. (2020). *Studi Eksperimental Penurunan Model Cakar Ayam Modifikasi (CAM) Pada Tanah Gambut Di Bawah Timbunan*. Skripsi. Universitas Islam Riau.
- Khoury, I., Sargand, S., & Hatton, D. C. (2022). Impact of Base Type on Performance of Rigid Pavement: A Case Study. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(3), 888–899. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1778691>
- Niken, C., Rainal, Karami, M., & Sasana, P. (2020). Deep-Hair-Cracks Mechanism of Rigid Pavement in Humid Tropical Weather. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 857(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/857/1/012028>
- Notohadiprawiro, T. (1999). *Tanah dan Lingkungan*. Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan dan Kebudayaan. <https://onsearch.id/Record/IOS2863.JATEN000000000090689?widget=1>
- Nugroho, S. A., Zulnasari, A., Fatnanta, F., & Putra, A. D. (2019). Mechanical Behavior of Clay Soil Stabilized with Fly Ash and Bottom Ash. *Makara Journal of Technology*, 26(1), 1–7. <https://doi.org/10.7454/mst.v26i1.1444>
- Panduan Geoteknik I. (2002). Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah. Jakarta.
- Peck, R. B., Hanson, W. E., & Thornburn, T. H. (1953). *Foundation Engineering*. John Willey and Sons. New York. <https://easyengineering.net/foundation-engineering-book-pdf-by/>

- Plaxis 3D Material Models Manual 3D 2023.2.(2023a) Bentley Corporation. Pennsylvania.
- Plaxis 3D Reference Manual 3D 2023.2 (2023b). Bentley Corporation. Pennsylvania.
- Plaxis 3D Scientific Manual 3D 2023.2. (2023c) Bentley Corporation. Pennsylvania.
- Punmia, Jain, A. K., & Jain, A. K. (2017). *Soil Mechanics and Foundation* (17th ed.). Standard Book House. New Delhi.
<https://goldpdf.site/downloads/4862880-soil-mechanics-and-foundation-by-bc-punmia>
- Puri, A. (2015). *Studi Parametrik Perkerasan Sistem Pelat Terpaku Pada Tanah Lunak*. Laporan Akhir Penelitian Lembaga Penelitian Universitas Islam Riau.
- Sabilirrahman, S., & Mudiyono, R. (2019). Analysis of the Rigid Pavement Road Damages in The Segments of Pemalang-Tegal: A Research Reviewed from the Issues of Implementation and Handling. *Fondasi*, 24(1), 16–29.
<https://doi.org/10.30659/pondasi.v24i1.4994>
- Sebaran Tanah Lunak Indonesia. (2019). Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral. Jakarta.
- Shahin, M. A., & Putra, A. I. (2019). Use of Slag (With Cement) for Improving The Performance of Expansive Soil of Road Pavement Subgrade. *International Conference on Advances in Civil and Environmental Engineering*, 276, 05002. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201927605002>
- Siska, H. N., & Yakin, Y. A. (2016). Karakterisasi Sifat Fisis dan Mekanis Tanah Lunak di Gedebage. *RekaRacana: Jurnal Teknil Sipil*, 2(4), 44–55.
- Sosrodarsono, S., & Nakazawa, K. (2000). *Mekanika Tanah dan Teknik Fondasi* (7th ed.). PT Pradnya Paramita. Jakarta.
https://www.academia.edu/34823167/Mekanika_Tanah_dan_Teknik_Pondasi
- Suhendro, B. (2005). *Laporan Hasil Full Scale Loading Test Sistem Cakar Ayam Modifikasi di Lokasi Tanah Lunak Waru – Surabaya*.
- Suhendro, B. (2019). The Finite Element Method. In *Metode Elemen Hingga*. Jurusan Teknik Sipil, FT-UGM. Yogyakarta
- Susanty, R., & Astuti, R. A. (2000). *Studi Pustaka Analisis Perencanaan Pondasi Kaison*. Skripsi. Universitas Islam Indonesia.

- Teng, W. C. (1980). *Foundation Design*. Pentice Hall of India. New Delhi.
<https://id.scribd.com/document/423079040/Foundation-Design-Wayne-C-Teng-pdf>
- Utami, G. S., & Caroline, J. (2018). Analisis Pengaruh Perubahan Kadar Air Terhadap Parameter Kuat Geser Tanah. In *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan*.