

**KAJIAN USULAN FONDASI CAKAR AYAM BENTUK *HONEYCOMB*
SEBAGAI UPAYA MENGATASI PENURUNAN FONDASI
LAPIS KERAS DI ATAS TANAH LUNAK**

Skripsi

Oleh :

MUHAMMAD BILLY HARTAWAN

2015011026



**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

KAJIAN USULAN FONDASI CAKAR AYAM BENTUK *HONEYCOMB* SEBAGAI UPAYA MENGATASI PENURUNAN FONDASI LAPIS KERAS DI ATAS TANAH LUNAK

Oleh

MUHAMMAD BILLY HARTAWAN

Tanah lunak umumnya memiliki daya geser yang rendah dan kompresibilitas yang tinggi, yang dapat menyebabkan masalah penurunan tanah jangka panjang dan ketidakstabilan tanah. Penurunan tanah yang tidak dapat ditoleransi dapat mengakibatkan jalan yang tidak rata/rusak di sekitar area yang terkena dampak. Pada tahun 1961, Prof. Sedyatmo memperkenalkan pondasi "cakar ayam" sebagai upaya untuk mengatasi masalah tanah lunak ini. Inovasi pondasi "cakar ayam" terus dikembangkan untuk mencapai efektivitas dan efisiensi yang lebih besar. Ide-ide segar sangat penting untuk membuat pondasi "cakar ayam" lebih hemat biaya dan, tentu saja, sesuai dengan kebutuhan aplikasi lapangan. Berdasarkan prinsip efektivitas, konfigurasi *zigzag* merupakan alternatif yang layak untuk diteliti. Analisis dilakukan menggunakan Metode Elemen Hingga (*FEM*) dengan bantuan *software* PLAXIS 3D.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku lendutan di bawah beban tunggal pada fondasi cakar ayam Sedyatmo dan cakar ayam bentuk *honeycomb* dengan konfigurasi sejajar dan *zigzag*. Parameter pada penelitian ini menggunakan data sekunder dari studi tanah lunak yang dilakukan oleh Hardiyatmo pada tahun 2009, dan beban tunggal maksimum yang ditetapkan oleh beban unit Bina Marga tahun 1993.

Hasil analisis menunjukkan bahwa Lendutan yang terjadi pada cakar ayam Sedyatmo dan *honeycomb* tidak jauh berbeda secara signifikan dengan selisih lendutan terbesar 0,24 mm dan persentase lendutan 7,7% pada konfigurasi serta letak beban yang sama sehingga cakar ayam bentuk *honeycomb* dapat diaplikasikan di lapangan.

Kata kunci: Kompresibilitas, Ketidakstabilan Tanah, Cakar Ayam, *Honeycomb*, *FEM*

ABSTRAK

STUDY OF PROPOSED HONEYCOMB SHAPED CAKAR AYAM FOUNDATION AS A COUNTERMEASURE OF RIGID PAVEMENT FOUNDATION SETTLEMENT ON SOFT SOIL

By

MUHAMMAD BILLY HARTAWAN

Soft soils generally have low shear strength and high compressibility, which can lead to long-term settlement problems and soil instability. Intolerable soil settlement can result in uneven or damaged roads around the affected area. In 1961, Prof. Sedyatmo introduced the Cakar Ayam foundation as an effort to overcome this soft soil problem. The innovation of the Cakar Ayam foundation continues to be developed to achieve greater effectiveness and efficiency. Fresh ideas are essential to make the Cakar Ayam foundation more effective and, of course, suitable for field application needs. Based on the principle of effectiveness, the zigzag configuration is a feasible alternative to be studied. The analysis was carried out using the Finite Element Method (FEM) with the help of PLAXIS 3D software. This research aims to analyze the deflection behavior under single load on the Sedyatmo and honeycomb shaped Cakar Ayam foundation with parallel and zigzag configurations. The parameters in this study use secondary data from a soft soil study conducted by Hardiyatmo in 2009, and the maximum single load set by the Bina Marga unit load in 1993. The results of the analysis show that the deflection that occurs on the Sedyatmo and honeycomb shaped Cakar Ayam foundation is not significantly different with the largest deflection difference of 0.24 mm and a deflection percentage of 7.7% for the same configuration and load position so that the honeycomb shaped cakar ayam foundation can be applied in the field.

Keywords: Compressibility, Soil Instability, Cakar Ayam, Honeycomb, FEM

**KAJIAN USULAN FONDASI CAKAR AYAM BENTUK *HONEYCOMB*
SEBAGAI UPAYA MENGATASI PENURUNAN FONDASI
LAPIS KERAS DI ATAS TANAH LUNAK**

Oleh :

MUHAMMAD BILLY HARTAWAN

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

Judul Skripsi : **KAJIAN USULAN FONDASI CAKAR AYAM BENTUK HONEYCOMB SEBAGAI UPAYA MENGATASI PENURUNAN FONDASI LAPIS KERAS DI ATAS TANAH LUNAK**

Nama Mahasiswa : **Muhammad Billy Hartawan**

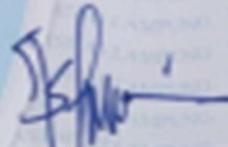
Nomor Pokok Mahasiswa : 2015011066

Program Studi : Teknik Sipil

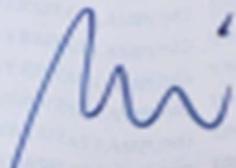
Fakultas : Teknik



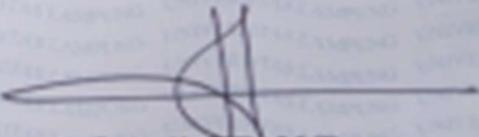

Ir. Andius Dasa Putra, S.T.M.T., Ph.D.
NIP 19731018 200012 1 001


Ir. Aminudin Syah, S.T., M.Eng.
NIP 19880323 201903 1 019

2. Ketua Jurusan Teknik Sipil


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

3. Ketua Program Studi Teknik Sipil

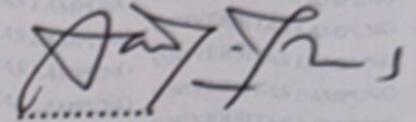

Suyadi, S.T., M.T.
NIP 19741225200501 1 003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

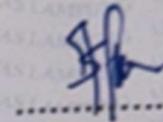
Ketua

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



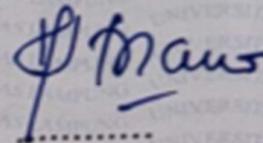
Sekretaris

: Ir. Aminudin Syah, S.T., M.Eng.



Penguji

**Bukan Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A.,
IPM., ASEAN-Eng.**

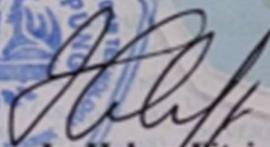


2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. }

NIP 19750928 200112 1 002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 9 Juli 2024

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Billy Hartawan
NPM : 2015011026
Prodi/Jurusan : S1 Teknik Sipil
Fakultas : Fakultas Teknik Universitas Lampung

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul "*KAJIAN USULAN FONDASI CAKAR AYAM BENTUK HONEYCOMB SEBAGAI UPAYA MENGATASI PENURUNAN FONDASI LAPIS KERAS 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.

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, 15 Juli, 2024



Muhammad Billy Hartawan

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Muhammad Billy Hartawan lahir di Bandar Lampung pada tanggal 26 Juni 2001 dan merupakan anak kedua dari Bapak Gatot Eko Susilo dan Ibu Yun Anis. Penulis memulai jenjang pendidikan tingkat dasar di SDN 3 Gunung Terang pada tahun 2009-2014. Selanjutnya, penulis menempuh pendidikan menengah pertama di SMPN 19 Bandar Lampung pada tahun 2014-2017 dan dilanjutkan menempuh pendidikan menengah atas di SMAN 5 Bandar Lampung 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). Di tahun yang sama penulis menjadi *awardee* Beasiswa Unggulan hingga lulus. Selama menjadi seorang mahasiswa, penulis berperan aktif dalam organisasi intrakampus seperti 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 Tender Competition pada acara Civil Bring Revolution 8th Unila 2023. 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 daya dukung fondasi *borpile* dengan bantuan software PLAXIS 2D. Di tahun yang sama, Penulis juga telah mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) periode I di Desa Lingai, Kecamatan Menggala Timur, Kabupaten Tulang Bawang selama 40 hari yaitu pada Bulan Januari – Februari 2024. Penulis juga aktif mengikuti beberapa kegiatan perlombaan dan telah menorehkan beberapa prestasi seperti Finalis Lomba

Rancang Beton SCC Mutu Tinggi Berbahan Dasar Limbah Tingkat Internasional oleh UNS, menulis jurnal dalam event internasional “The Universitas Lampung International Conference on Sciences, Technology, and Environment (ULICoSTE) 2023” 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 USULAN FONDASI CAKAR AYAM BENTUK HONEYCOMB SEBAGAI UPAYA MENGATASI PENURUNAN FONDASI LAPIS KERAS DI ATAS TANAH LUNAK**. Penelitian ini mengkaji kinerja fondasi cakar ayam dengan bentuk *honeycomb* sebagai upaya penulis untuk mengatasi 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:

Allah SWT.

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

Keluarga Tercinta

Bapak, Ibu, Kakak, Adik, 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.

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 **KAJIAN USULAN FONDASI CAKAR AYAM BENTUK HONEYCOMB SEBAGAI UPAYA MENGATASI PENURUNAN FONDASI LAPIS KERAS 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. Allah SWT. 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., IPM. 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. Aminudin Syah, S.T., M.eng., 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 Kristianto Usman S.T., M.T., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing Akademik atas arahan dan strategi yang diberikan dalam menempuh dan menyelesaikan masa studi di Teknik Sipil Universitas Lampung.
9. Alm. Bapak Gatot Eko Susilo S.T., M.Sc., Ph.D. selaku ayah atas arahan, strategi, ilmu, serta dukungan moral dan material yang diberikan dalam menempuh hidup ini.
10. Ibu Yun Anis S.Pd., M.Pd. selaku ibu atas arahan, ilmu, serta dukungan moral dan material yang diberikan dalam menempuh hidup ini.
11. Muhamad Bobby Hartawan S.T. selaku kakak atas pengganti ayah yang sering menjadi teman bicara, diskusi, serta memberikan arahan, strategi, ilmu, serta dukungan moral dan material yang diberikan dalam menempuh hidup ini.
12. Keluarga tercinta terutama ayah, ibu, kakak, adik, 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.
13. 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.
14. 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.
15. Rekan-rekan Aardewiza (Ryan, Farrisqie), rekan-rekan Slebew (Yoga, Usnul, Indah, Siti, Deya), rekan-rekan geoteknik (Adrian, David, Vanno, Jayadi, Sultan), serta beberapa kawan dekat penulis yaitu Habib, 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.

16. 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.
17. Teman-teman Angkatan 2019 yang turut serta membantu dalam berbagi informasi dan strategi serta pengalamannya dalam penyelesaian skripsi.

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

Muhammmad Billy Hartawan

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	iii
DAFTAR TABEL	v
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Tanah.....	6
2.1.1 Klasifikasi Tanah	7
2.2.2 Tanah Lunak	12
2.2 Perkerasan Jalan.....	19
2.2.1 Perkerasan Kaku.....	20
2.2.2 Pengaruh Tanah Dasar Lunak pada Kinerja Perkerasan Jalan	21
2.3 Sistem Perkerasan Cakar Ayam Prof. Sedyatmo	22
2.4 Efisiensi Bentuk <i>Honeycomb</i>	23
2.5 Metode Elemen Hingga 3 Dimensi.....	24
2.5.1 <i>Software Plaxis</i>	26
2.5.2 Diskritisasi Elemen pada Plaxis 3D	27

2.5.3 Model Material Mohr-Coulomb Tanah pada Aplikasi Plaxis 3D..	30
2.5.4 Tegangan pada Plaxis 3D	35
2.5.5 Regangan pada Plaxis 3D.....	36
2.5.6 <i>Interface</i> pada Plaxis 3D	36
2.6 Penelitian Terdahulu	37
III. METODE PENELITIAN.....	41
3.1 Sampel Tanah.....	41
3.2 Material Beton	42
3.3 Perbandingan pada Pengujian Cakar Ayam Bentuk <i>Honeycomb</i>	43
3.4 Tahapan Analisis	45
3.5 Penentuan Sampel.....	47
3.6 Pembebanan	49
3.7 Penyajian Hasil	51
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	52
4.1 Umum	52
4.2 Hasil Uji Pemodelan Fondasi Cakar Ayam.....	52
4.2.1 Analisis Lendutan Fondasi Cakar Ayam Sedyatmo	52
4.2.2 Analisis Lendutan Fondasi Cakar Ayam Bentuk <i>Honeycomb</i>	55
4.3 Perbandingan Fondasi Cakar Ayam Sedyatmo dan Cakar Ayam Bentuk <i>Honeycomb</i>	57
4.3.1 Tinjauan sumbu x dan y	57
4.3.2 Letak Beban di Titik A	57
4.3.3 Letak Beban di Titik B	40
4.3.4 Letak Beban di Titik C	40
4.3.5 Letak Beban di Bagian D	40
4.3.6 Hasil Analisis Keseluruhan.....	70
V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	72
5.1 Kesimpulan	72
5.2 Saran	73
DAFTAR PUSTAKA.....	74

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Kegagalan timbunan di atas tanah (Sumber : Mochtar, 2000).....	15
Gambar 2.2 Prinsip dasar fondasi cakar ayam sediyatmo (Muhu, 2007)	23
Gambar 2.3 Diskritasi elemen 3D	25
Gambar 2.4 Fungsi bentuk, penomoran, posisi nodal lokal (•), titik integrasi (x) dan ilustrasi dari elemen segitiga 6 nodal	27
Gambar 2.5 Fungsi bentuk, penomoran dan ilustrasi elemen segitiga 15 nodal.	28
Gambar 2.6 Fungsi bentuk, penomoran dan ilustrasi elemen	29
Gambar 2.7 Ide dasar model linear elastis sempurna.....	32
Gambar 2.8 Model non-linear tanah	33
Gambar 2.9 Fungsi leleh Mohr-Coulomb dalam ruang principal	35
Gambar 2.10 Sistem koordinat tiga dimensi umum dan konvensi tanda untuk tegangan (Bentley Reference Manual, 2022)	35
Gambar 2.11 Geometri elemen interface	37
Gambar 2.12 Penghematan ruang dengan bentuk honeycomb	37
Gambar 2.13 Analisis metode elemen hingga oleh Suhendro dan.....	38
Gambar 2.14 Hasil grafik uji skala penuh metode CAM.....	39
Gambar 2.15 Analisis metode elemen hingga oleh Puri (2015).....	40
Gambar 3.1 Tipikal sistem perkerasan cakar ayam Sedyatmo (Suhendro dan Hardiyatmo, 2010)	43
Gambar 3.2 Tipikal sistem perkerasan cakar ayam Sedyatmo yang akan dimodelkan.....	44
Gambar 3.3 Flowchart penelitian.....	46
Gambar 3.4 Flowchart penelitian (lanjutan)	47
Gambar 3.5 Tipikal sistem perkerasan cakar ayam honeycomb yang akan dimodelkan.....	48

Gambar 3.6	Konfigurasi pola zigzag cakar ayam Sedyatmo	49
Gambar 3.7	Konfigurasi pola zigzag cakar ayam honeycomb	49
Gambar 3.8	Aturan pembebanan (Bina Marga, 1993)	50
Gambar 4.1	Tipikal fondasi cakar ayam sediyatmo untuk 8 baris tiang ("8×3")	53
Gambar 4.2	Tipikal fondasi cakar ayam sediyatmo untuk 8 baris tiang konfigurasi zigzag	54
Gambar 4.3	Tipikal element mesh pada fondasi cakar ayam sediyatmo	54
Gambar 4.4	Tipikal fondasi cakar ayam bentuk honeycomb untuk 8 baris tiang ("8×3")	55
Gambar 4.5	Tipikal fondasi cakar ayam bentuk honeycomb untuk 8 baris tiang konfigurasi zigzag.....	56
Gambar 4.6	Tipikal element mesh pada fondasi cakar ayam bentuk honeycomb	56
Gambar 4.7	Tinjauan sumbu x dan y pada analisis lendutan	57
Gambar 4.8	Hasil analisis lendutan titik A sumbu x pada fondasi cakar ayam ..	59
Gambar 4.9	Hasil analisis lendutan titik A sumbu y pada fondasi cakar ayam ..	60
Gambar 4.10	Hasil analisis lendutan titik B sumbu x pada fondasi cakar ayam ..	62
Gambar 4.11	Hasil analisis lendutan titik B sumbu y pada fondasi cakar ayam ..	63
Gambar 4.12	Hasil analisis lendutan titik C sumbu x pada fondasi cakar ayam ..	65
Gambar 4.13	Hasil analisis lendutan titik C sumbu y pada fondasi cakar ayam ..	66
Gambar 4.14	Hasil analisis lendutan titik D sumbu x pada fondasi cakar ayam ..	68
Gambar 4.15	Hasil analisis lendutan titik D sumbu y pada fondasi cakar ayam ..	69

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1 Simbol Klasifikasi Tanah berdasarkan USCS	8
Tabel 2.2 Sistem Klasifikasi Tanah Metode AASHTO	11
Tabel 2.3 Klasifikasi Tanah Berdasarkan Kadar Organik	13
Tabel 2.4 Perkiraan Nilai Modulus Young Tanah Lunak	16
Tabel 2.5 Perkiraan Nilai Berat Jenis Tanah	17
Tabel 2.6 Perkiraan Nilai Poisson Ratio Tanah	17
Tabel 2.7 Nilai Kuat Geser Undrained Tanah	18
Tabel 2.8 Perkiraan Nilai Kuat Tekan Bebas	18
Tabel 2.9 Nilai Kohesi Tanah	19
Tabel 3.1 Uji Soil Properties dan Soil Engineering Tanah Lunak Waru (Firdiansyah, 2010).....	41
Tabel 3.2 Material Beton K225	42
Tabel 3.3 Material Beton K350	42
Tabel 4.1 Hasil Keseluruhan Analisis Lendutan Maksimal	70

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tanah lunak merupakan masalah umum di banyak tempat di seluruh dunia yang menyebabkan berbagai masalah seperti daya dukung tanah yang rendah, penurunan tanah, ketidakstabilan tanah. (Das, 1998). Dalam kasus konstruksi jalan, umumnya digunakan perkerasan kaku sebagai konstruksi jalan di atas permukaan tanah lunak. Lapisan perkerasan dapat diletakkan langsung di atas tanah lunak. Namun, karena distribusi beban yang tidak merata di atas perkerasan, penurunan pada tanah lunak di bawahnya menjadi tidak merata. Perkerasan jalan menerima langsung beban siklik dari kendaraan, yang membuat perkerasan mengalami momen lentur berulang. Hal inilah yang disebut dengan undulasi jalan yang menyebabkan retaknya struktur perkerasan. Tanah lunak memerlukan perkerasan yang lebih kokoh agar dapat menjadi solusi atas masalah tanah lunak. Sebagai solusi atas tantangan ini pada tahun 1961, Prof. Sedyatmo mengusulkan fondasi "cakar ayam". Fondasi "cakar ayam" adalah jenis fondasi yang digunakan untuk mendistribusikan beban struktural ke area yang lebih luas dari tanah lunak yang dapat membantu mengurangi penurunan tanah yang signifikan dan meningkatkan stabilitas fondasi (Hardiyatmo, 2011).

Di Indonesia, fondasi "cakar ayam" telah terbukti menjadi solusi yang sangat baik untuk masalah tanah lunak. Para peneliti telah bekerja untuk menghasilkan desain baru, lebih efektif, dan efisien untuk fondasi "cakar ayam" dalam beberapa tahun terakhir, seperti karya peneliti sebelumnya (Hardiyatmo, 2008, 2009, 2011; Nasibu, 2009; Dewi, 2009; Puri,

dkk.,2011a, 2012b, 2013a, 2013b). Namun, pasti selalu ada kesempatan untuk pengembangan inovasi.

Seorang matematikawan (Hales, 2001) menyatakan bahwa cara paling efisien untuk memaksimalkan volume adalah melalui bentuk heksagonal teratur. Ini mengimplikasikan bahwa desain heksagonal sarang lebah pada fondasi "cakar ayam" adalah salah satu desain baru yang menjanjikan. Desain heksagonal sarang lebah pada fondasi "cakar ayam" bekerja dengan cara yang mirip dengan fondasi "cakar ayam" konvensional yaitu beban ditransfer ke tanah melalui struktur "cakar ayam" yang tertanam di tanah.

Penelitian ini memiliki tujuan untuk membandingkan suatu alternatif model yang baru pada sistem perkerasan jalan dengan menggunakan fondasi cakar ayam bentuk *honeycomb*. Gagasan ini muncul sebagai alternatif fondasi sistem perkerasan jalan dengan asumsi bahwa fondasi cakar ayam bentuk *honeycomb* dapat bekerja lebih baik jika dibandingkan dengan fondasi cakar ayam Sedyatmo dengan fokus penelitian yaitu analisis *displacement*. Pada penelitian ini dilakukan analisis dengan membandingkan *displacement* pada titik-titik yang dianggap kritis oleh peneliti. Peneliti juga melakukan variasi letak fondasi secara sejajar dan *zigzag* untuk analisis pada penelitian ini. Penelitian dilakukan dengan bantuan software geoteknik Plaxis 3D yang berbasis metode elemen hingga untuk analisis *displacement*nya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas maka dapat dirumuskan masalah yang akan dibahas yaitu :

1. Apakah sistem perkerasan jalan dengan fondasi cakar ayam bentuk *honeycomb* lebih baik jika dibandingkan dengan fondasi cakar ayam konvensional ?
2. Berapakah perbedaan *displacement* pada fondasi cakar ayam heksagonal jika dibandingkan dengan fondasi cakar ayam Sedyatmo ?

3. Apakah fondasi cakar ayam bentuk *honeycomb* layak untuk diterapkan pada perkerasan kaku di atas tanah lunak ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis perbandingan fondasi cakar ayam model *honeycomb* dengan fondasi cakar ayam konvensional.
2. Menganalisis perbedaan *displacement* perkuatan fondasi cakar ayam model *honeycomb* dan fondasi cakar ayam Sedyatmo.
3. Mengevaluasi hasil analisis fondasi cakar ayam berbentuk *honeycomb* untuk diterapkan pada perkerasan kaku di atas tanah lunak.

1.4 Batasan Masalah

Batasan-batasan masalah yang ditetapkan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Data tanah lunak yang digunakan pada penelitian ini merupakan data sekunder dan merupakan tanah yang sama dengan tanah pengujian uji sistem CAM Suhendro yaitu tanah lempung Waru, Surabaya.
2. Analisis *displacement* pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan software geoteknik Plaxis 3D.
3. Model keruntuhan yang dipakai pada tanah adalah model keruntuhan Mohr-Coulomb
4. Penelitian ini hanya berfokus pada analisis dari segi *displacement* pada perkuatan fondasi cakar ayam dengan bentuk bulat (konvensional) dan bentuk *honeycomb* dengan perletakan sejajar dan *zigzag*.
5. Material beton yang dimodelkan pada penelitian ini menggunakan mutu yang sama dengan cakar ayam Sedyatmo yaitu, untuk pelat beton K350 (31,2 Mpa) dan untuk fondasi perkerasan jalan menggunakan beton K225 (19,3 Mpa)
6. Pembebanan yang diterapkan merupakan beban muatan sumbu tunggal yang diambil dari referensi truk muatan terbesar menurut (Bina Marga, 1993) jenis truk trailer konfigurasi 1,2 – 2,2 dengan berat total

maksimum 42 ton, berat total maksimum disebarakan ke seluruh truk yang kemudian ditemukan 54% sebagai sebaran terbesarnya. Muatan sumbu tunggal yang diterapkan yaitu 22,68 ton.

7. Posisi pembebanan dilakukan pada empat variasi posisi yang dianggap kritis yaitu tepat pada pusat fondasi cakar ayam bagian tengah, di tengah-tengah garis as pondasi, di antara garis as pondasi, dan di pusat fondasi cakar ayam bagian tepi.
8. Letak fondasi cakar ayam pada penelitian ini dikonfigurasi sejajar dan *zigzag*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Sebagai referensi analisis suatu model alternatif sistem perkerasan jalan dengan fondasi cakar ayam bentuk *honeycomb* untuk konstruksi perkerasan kaku di atas tanah lunak.
2. Menjadi kontribusi pemikiran bagi perkembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik sipil.
3. Menambah pengetahuan dan wawasan terkait sistem perkerasan jalan di atas tanah lunak.
4. Sebagai syarat mahasiswa dalam memenuhi kewajiban akademis guna meraih gelar sarjana.

1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika dalam penulisan pada penelitian ini terdiri dari sebagai berikut:

1. BAB I PENDAHULUAN
Bab ini berisi uraian mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, manfaat, dan sistematika penulisan laporan.
2. BAB II TINJAUAN PUSTAKA
Bab ini berisi tentang landasan teori fundamental sebagai penunjang penelitian yang akan dilakukan.

3. BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi uraian mengenai gambaran umum dan metode yang akan digunakan untuk memperoleh data – data yang dibutuhkan.

4. BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas tentang hasil pengumpulan data, pengolahan data, analisis serta pembahasan data berdasarkan teori yang ada.

5. BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan akhir yang merupakan hasil dari pembahasan yang didapat dari pengolahan data dan saran dari hasil tersebut.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah

Tanah dikenal sebagai material yang terbentuk dari butiran mineral padat yang tidak terikat secara kimia dan bahan organik yang sudah mengalami pelapukan. Selain itu, tanah juga memiliki zat cair dan gas yang mengisi ruang kosong antara partikelnya (Das, 1998).

Dalam konstruksi, tanah memiliki peranan krusial. Tanah dijadikan sebagai bahan dalam beragam proyek teknik sipil, dengan fungsi utamanya sebagai landasan bagi bangunan. Agar tanah dapat mendukung konstruksi di atasnya, stabilitas tanah adalah hal penting; jika tanah tidak stabil, perbaikan harus dilakukan.

Berdasarkan Bowles (1989), tanah merupakan gabungan partikel-partikel yang bisa terdiri dari:

1. Berangkal: potongan batu besar dengan ukuran biasanya lebih dari 250 mm hingga 300 mm. Jika ukurannya antara 150 mm hingga 250 mm, disebut kerakal;
2. Kerikil: partikel dengan ukuran 5 mm hingga 150 mm;
3. Pasir: partikel dengan ukuran 0,074 mm hingga 5 mm yang berkisar dari kasar hingga halus;
4. Lanau: partikel dengan ukuran 0,002 mm hingga 0,074 mm yang banyak ditemukan di daerah endapan danau atau pantai;
5. Lempung: partikel mineral kecil kurang dari 0,002 mm yang menjadi sumber utama kohesi pada tanah;

6. Koloid: partikel mineral diam yang ukurannya kurang dari 0,001 mm.

2.1.1 Klasifikasi Tanah

Klasifikasi tanah merupakan metode pengkategorian jenis-jenis tanah berdasarkan ciri-cirinya. Meski sistem klasifikasi memberikan gambaran umum tentang sifat tanah, tidak satupun yang memberikan penjelasan detil tentang kegunaannya (Das, 1998).

Tujuan dari klasifikasi tanah adalah untuk menentukan apakah suatu jenis tanah cocok untuk keperluan tertentu dan untuk menyediakan informasi mengenai kondisi tanah di suatu area ke area lain berdasarkan data seperti karakteristik pemadatan, kekuatan, berat isi, dan lain-lain (Bowles, 1989)." Berikut ini diberikan penjelasan mengenai klasifikasi tanah berdasarkan USCS dan AASHTO.

1. Klasifikasi Tanah Berdasarkan *Unified Soil Classification System* (USCS)

Sistem klasifikasi tanah yang sering diterapkan dalam pekerjaan Teknik Fondasi, termasuk pembangunan bendungan, gedung, dan struktur lainnya. Metode ini juga kerap digunakan dalam desain lapangan terbang dan spesifikasi tanah untuk pembangunan jalan. Berdasarkan USCS di dalam buku (Das, 1998), tanah dibagi menjadi:

1. Tanah butir kasar (*coarse-grained-soil*), tanah yang sebagian besar terdiri dari kerikil dan pasir dimana lebih dari 50% berat total sampel tanah tidak lolos ayakan No. 200. Simbol dari tanah ini dimulai dengan huruf awal *G* atau *S*. *G* untuk tanah kerikil (gravel), dan *S* adalah untuk tanah berpasir (sand); dan
2. Tanah berbutir halus (*fine-grained-soil*), tanah yang dimana lebih dari 50% berat total tanah lolos ayakan No. 200. Simbol dari tanah ini dimulai dengan huruf awal *M* untuk

lanau (*silt*) anorganik, *C* untuk lempung (*clay*) anorganik, dan *O* untuk lanau organik dan lempung organik. Simbol *PT* digunakan untuk tanah gambut (*peat*), *muck*, dan tanah-tanah lain dengan kadar organik yang tinggi.

Tanah berbutir kasar ditandai dengan simbol kelompok seperti *GW*, *GP*, *GM*, *GC*, *SW*, *SP*, *SM*, dan *SC*. Untuk klasifikasi yang benar, perlu memperhatikan faktor-faktor berikut ini:

1. Prosentase butiran yang lolos ayakan No. 200 (fraksi halus);
2. Prosentase fraksi kasar yang lolos ayakan No. 40;
3. Koefisien keseragaman (*uniformity coefficient, Cu*) dan koefisien gradasi (*gradation coefficient, Cc*) untuk tanah dimana 0 – 12% lolos ayakan No. 200; dan
4. Batas cair (*LL*) dan Indeks Plastisitas (*PI*) bagian tanah yang lolos ayakan No. 40 (untuk tanah dimana 5% atau lebih lolos ayakan No. 200). Selanjutnya tanah diklasifikasikan dalam sejumlah kelompok dan sub kelompok seperti terlihat pada Tabel 2.1 berikut:

Tabel 2.1 Simbol Klasifikasi Tanah berdasarkan USCS

Jenis Tanah	Simbol	Sub Kelompok	Simbol
Kerikil	<i>G</i>	Gradasi Baik	<i>W</i>
		Gradasi Buruk	<i>P</i>
Pasir	<i>S</i>	Berlanau	<i>M</i>
		Berlempung	<i>C</i>
Lanau	<i>M</i>	<i>LL</i> <50%	<i>L</i>
Lempung	<i>C</i>		
Organik	<i>O</i>	<i>LL</i> >50%	<i>H</i>
Gambut	<i>PT</i>		

Sumber: Bowles (1989)

2. Klasifikasi Tanah Berdasarkan AASHTO

Sistem Klasifikasi AASHTO mengkategorikan tanah ke dalam delapan kelompok utama, yaitu A-1 hingga A-8, yang dibagi menjadi sub-sub kelompok. Evaluasi tanah dalam setiap kelompok dilakukan berdasarkan indeks kelompoknya. Tanah granuler diklasifikasikan sebagai A-1 hingga A-3. Tanah A-1 merupakan tanah granuler dengan gradasi baik, sedangkan A-3 adalah pasir bersih dengan gradasi buruk. Tanah A-2 termasuk tanah granuler (dengan persentase lolos saringan No. 200 kurang dari 35%), namun mengandung lanau dan lempung. Tanah berbutir halus dikategorikan sebagai A-4 hingga A-7, meliputi tanah lempung dan tanah lanau. Perbedaan antar kelompok ini didasarkan pada batas-batas *Atterberg*, yang digunakan untuk menentukan batas cair (*LL*) dan indeks plastisitas (*PI*) pada kelompok A-4 hingga A-7 serta sub kelompok A-2. Tanah organik tinggi, seperti gambut, dikategorikan sebagai A-8. Evaluasi lebih lanjut terhadap tanah dalam setiap kelompok dilakukan dengan menggunakan indeks kelompok (*GI*). Perhitungan *GI* dilakukan dengan menggunakan Persamaan 2.1 berikut ini:

$$GI = (F-35)[0,2+0,005(LL-40)]+0,01(F-15)(PI-10)..... \text{ (Pers. 2.1)}$$

dengan :

GI = indeks kelompok (*group index*)

F = persen butiran lolos saringan No. 200 (0.075 mm)

LL = batas cair

PI = indeks plastisitas

Terdapat beberapa aturan untuk menggunakan nilai *GI*, yaitu:

1. Bila $GI < 0$, maka dianggap $GI = 0$,

2. nilai GI yang dihitung dari Persamaan (3.4), dibulatkan pada angka terdekat,
3. Nilai GI untuk kelompok tanah A-1a, A-1b, A-2-4, A-2-5, dan A-3 selalu nol,
4. Untuk kelompok tanah A-2-6 dan A-2-7, hanya bagian dari persamaan indeks kelompok yang digunakan, $GI = 0,01 (F - 15) (PI - 10)$, dan
5. Tidak ada batas atas nilai GI , GI maksimum 20.

Klasifikasi menurut AASHTO dapat dilihat pada Tabel 2. 2 sebagai berikut.

Tabel 2.2 Sistem Klasifikasi Tanah Metode AASHTO

Klasifikasi umum	Material granuler (<35% lolos saringan No. 200)							Tanah-tanah lanau-lempung (<35% lolos saringan No. 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	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)											
2,00 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		Np	10 maks	10 maks	11 min	11 min	10 maks	10 maks	11 min	11 min
Indeks kelompok (G)	0		0	0		4 maks		8 maks	12 maks	16 maks	20 maks
Tipe material yang pokok pada umumnya	Pecahan batu, kerikil dan pasir		Pasir halus	Kerikil berlanau atau berlempung dan pasir				Tanah berlanau		Tenah berlempung	
Penilaian umum sebagai tanah dasar	Sangat baik sampai baik							Sedang sampai buruk			

Sumber : Hardiyatmo, 2006

2.2.2 Tanah Lunak

Menurut Panduan Geoteknik 1, 2001 penggunaan kata “tanah lunak” berkaitan dengan tanah-tanah yang jika tidak diselidiki secara teliti dapat menyebabkan masalah stabilitas tanah dan penurunan jangka panjang yang tidak dapat ditoleransi, tanah tersebut mempunyai kuat geser yang rendah dan kompresibilitas yang tinggi. Adapun salah satu tipe tanah yang termasuk dalam jenis tanah lunak adalah gambut dan lempung lunak. Menurut (Bina Marga, 1999) tanah lunak adalah tanah yang umumnya terdiri dari tanah lempung dan termasuk dalam material fondasi yang sangat jelek karena kadar air yang tinggi, permeabilitas rendah dan sangat *compressible* dan tanah yang secara visual dapat ditembus dengan ibu jari minimum sedalam ± 25 mm, atau mempunyai kuat geser 40 kPa berdasarkan uji geser lapangan.

Jika suatu konstruksi dibangun diatas tanah lunak, maka kerusakan-kerusakan yang berpotensi terjadi yaitu, retak pada perkerasan jalan, struktur plat yang terangkat, jembulan tanah (*soil heaving*), longsoran, dan sebagainya. Sehingga perlu untuk mengetahui sifat-sifat dasar tanah, kemampuan mengalirkan air, kompresibilitas tanah, kekuatan geser, kapasitas daya dukung tanah terhadap beban dan lain-lain.

1. Sifat Tanah Lunak

Tanah lunak merupakan tanah kohesif yang terdiri dari sebagian besar lempung atau lanau. Tanah lunak mempunyai sifat antara lain, gaya gesernya kecil, kompresibilitas tinggi, koefisien permeabilitas yang kecil, dan daya dukungnya rendah jika dibandingkan dengan tanah lempung lainnya. Tanah lunak secara umum mempunyai sifat-sifat sebagai berikut:

1. Gaya gesernya kecil;
2. Kemampatan yang besar;

3. Permeabilitas tinggi;
4. Tanah lunak memiliki sifat kompresibilitas yang tinggi. Salah satu faktor yang menyebabkan tingginya tingkat kompresibilitas pada tanah lunak adalah karena tanah lunak memiliki angka pori yang tinggi; dan
5. Memiliki kadar air yang tinggi sehingga menyebabkan tanah lunak memiliki daya dukung yang sangat rendah dan memiliki masalah penurunan yang besar. Kadar air tanah lunak bervariasi tergantung pada kenaikan dari tingkat plastisitas dan struktur tanah tersebut.

Berdasarkan uji lapangan, tanah lunak secara fisik dapat diremas dengan mudah oleh jari-jari tangan. Menurut (Das, 1998) nilai hasil pengujian di lapangan dan di laboratorium akan menunjukkan bahwa tanah tersebut lunak apabila koefisien rembesan (k) sangat rendah $\leq 0,0000001$ cm/detik, batas cair (LL) $\geq 50\%$, angka pori (e) antara 2,5 – 3,2, kadar air dalam keadaan jenuh antara 90% – 120% dan berat spesifik (G_s) berkisar antara 2,6 – 2,9.

2. Tipe Tanah Lunak

Unified Soil Classification System (USCS) membagi tanah lunak menjadi tiga kelompok utama yaitu tanah berbutir kasar, tanah berbutir halus, dan tanah dengan kandungan organik yang tinggi.

Tabel 2.3 Klasifikasi Tanah Berdasarkan Kadar Organik

Kadar Organik	Kelompok Tanah
> 75%	Gambut
25% - 75%	Tanah Organik
< 25%	Tanah dengan kadar organik rendah

Sumber : Panduan Geoteknik (2001)

3. Permasalahan Pada Tanah Lunak

Sebagai pendukung infrastruktur transportasi, tanah lunak mempunyai daya dukung yang relatif rendah serta kompresibilitas tinggi yang berlangsung relatif lama. Apabila sifat dari tanah lunak tidak diperbaiki terlebih dahulu, maka infrastruktur yang dibangun di atasnya akan berpotensi mengalami kerusakan sebelum mencapai umur konstruksi yang direncanakan. Berikut ini permasalahan pada tanah lunak.

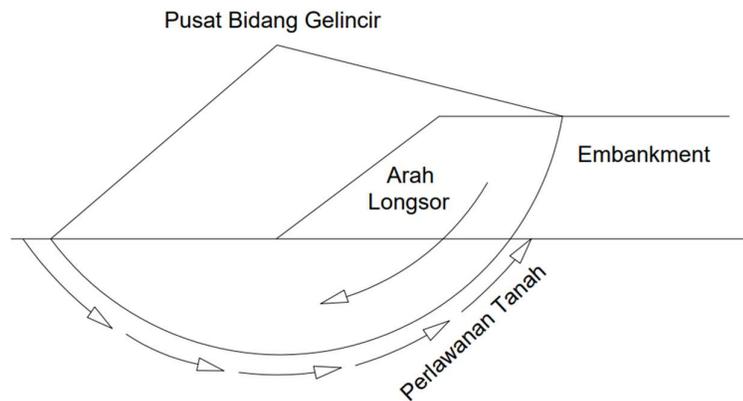
1. Daya dukung tanah yang rendah.

Daya dukung tanah adalah kemampuan tanah untuk menopang suatu beban di atasnya. Daya dukung tanah dipengaruhi oleh kadar air, kohesi tanah, sudut geser dalam, dan tegangan normal tanah. Daya dukung tanah yang rendah akan menyebabkan gangguan stabilitas dari timbunan dan menyebabkan tinggi timbunan yang dapat dilakukan menjadi sangat terbatas, sehingga untuk timbunan yang tinggi perlu dilakukan secara bertahap (*stage construction*) atau diberi perkuatan.

2. Penurunan yang besar.

Penurunan tanah dasar akan terjadi apabila tanah dasar tersebut menerima beban di atasnya. Penurunan tanah yang besar dapat menyebabkan muka jalan turun menjadi lebih rendah daripada elevasi rencana.

Salah satu permasalahan utama pada tanah lunak dalam suatu pekerjaan konstruksi adalah penurunan tanah yang besar. (Nugroho, 2011) Kemampuan tanah lunak untuk mendukung timbunan tanpa terjadi penurunan yang berlebih sangat bergantung dari kuat gesernya. Penurunan tanah berlangsung sangat lama sehingga lambat laun akan terjadi beda penurunan yang nyata (Mochtar, 2000) yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Kegagalan timbunan di atas tanah (Sumber : Mochtar, 2000)

Gambar 2.1 menunjukkan bahwa timbunan yang dilakukan di atas tanah lunak dapat menyebabkan kegagalan geoteknik pada timbunan maupun galian. Masalah kelongsoran yang terjadi dapat disebabkan oleh kurang baiknya perhatian dan kontrol pada saat perencanaan dan pelaksanaan. Dimana daya dukung tanah yang rendah dari tanah lunak di bawah timbunan dapat mengakibatkan sliding (kelongsoran) pada tanah timbunannya. Sedangkan penurunan (*settlement*) terjadi akibat proses *displacement* pada lapisan tanah akibat beban yang bekerja di atasnya. Keadaan tanah dasar yang lunak bila tidak ditangani dengan baik akan mempengaruhi kondisi badan jalan di atasnya dan akan mempercepat kerusakan jalan tersebut. Untuk timbunan badan jalan diperlukan analisis pada stabilitas dan penurunannya sehingga tinggi timbunan yang direncanakan tidak akan mengalami penurunan lagi setelah konstruksi selesai dibangun.

4. Parameter Tanah Lunak

Beberapa parameter yang dapat digunakan untuk menjadi acuan tanah lunak dijelaskan sebagai berikut.

1. Modulus *young* tanah (E)

Perbandingan tegangan regangan pada tanah mendefinisikan besarnya nilai elastisitas tanah yang direpresentasikan sebagai nilai modulus *young*. Berdasarkan nilai ini diperoleh dari uji triaksial. Look (2014) mendefinisikan perkiraan nilai modulus *young* tanah lunak seperti pada Tabel 2.4 berikut.

Tabel 2.4 Perkiraan Nilai Modulus *Young* Tanah Lunak

Tipe	Kekuatan tanah	Modulus <i>young</i> , E (MPa)	
		Jangka Pendek	Jangka Panjang
Kerikil	Longgar	25-50	
	Sedang	50-100	
	Padat	100-200	
Pasir sedang hingga pasir kasar	Sangat longgar	<5	
	Longgar	3-10	
	Sedang	8-30	
	Padat	25-50	
Pasir halus	Sangat padat	40-100	
	Longgar	5-10	
	Sedang	10-25	
	Padat	25-50	
Lanau	Lunak	< 10	< 8
	Kaku	10-20	8-15
	Keras	> 20	> 15
Lempung	Sangat lunak	< 3	< 2
	Lunak	2-7	1-5
	Kokoh	5-12	4-8
	Kaku	10-25	7-20
	Sangat Kaku	20-50	15-35
	Keras	40-80	30-60

(Sumber: Look, 2014)

2. Berat Jenis Tanah (G_s)

Berat jenis tanah merupakan perbandingan antara berat volume tanah butiran padat dengan berat volume air pada tanah. Das (1998) mendefinisikan perkiraan nilai berat jenis tanah seperti pada Tabel 2.5 berikut.

Tabel 2.5 Perkiraan Nilai Berat Jenis Tanah

Jenis tanah	Berat jenis (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, 1998)

3. *Poisson Ratio* (ν)

Poisson Ratio didefinisikan sebagai perbandingan antara regangan tanah arah tegak lurus dan longitudinal saat mengalami tegangan. Das (1998) mendefinisikan perkiraan nilai *poisson ratio* tanah seperti pada Tabel 2.6 berikut.

Tabel 2.6 Perkiraan Nilai *Poisson Ratio* Tanah

Jenis tanah	<i>Poisson Ratio</i> (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
<i>Loss</i>	0,3-0,4

(Sumber: Das, 1998)

4. Kuat Geser *Undrained* (C_u)

Kuat Geser *Undrained* didefinisikan sebagai tegangan geser maksimum yang dapat ditahan tanah tanpa mengalami perubahan volume. Kondisi *undrained* menunjukkan bahwa air selama pembebanan tidak diizinkan keluar dari tanah. Das (1998) mendefinisikan

perkiraan nilai kuat geser tanah seperti pada Tabel 2.7 berikut.

Tabel 2.7 Nilai Kuat Geser Undrained Tanah

Konsistensi tanah	Perkiraan nilai kuat geser <i>undrained</i> (C_u)	Perkiraan nilai $N-SPT$
Sangat lunak	0-12,5 kPa	0-2,5
Lunak	12,5-25 kPa	2,5-5
Menengah	25-50 kPa	5-10
Kaku	50-100 kPa	10-20
Sangat Kaku	100-200 kPa	20-40
Keras	> 200 kPa	> 40

(Sumber: Das, 1998)

5. Kuat tekan bebas (q_u)

Kuat tekan bebas didefinisikan sebagai tegangan aksial yang dapat ditahan oleh tanah sebelum runtuh. Pada kuat tekan bebas, perlawanan dari arah tegak lurus tanah (σ_3) = 0. Peck *et. al* (1953) dalam buku Das (1998) mendefinisikan perkiraan nilai kuat tekan bebas tanah seperti pada Tabel 2.8 berikut.

Tabel 2.8 Perkiraan Nilai Kuat Tekan Bebas

Konsistensi tanah	Identifikasi Lapangan	q_u (kN/m ²)
Sangat lunak	Dengan mudah ditembus beberapa inci dengan kepala tanah	< 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

Konsistensi tanah	Identifikasi Lapangan	q_u (kN/m ²)
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	Melekuk bila ditekan dengan kuku ibu jari, tapi dengan kekuatan besar	> 400

(Sumber: Das, 1998)

6. Kohesi

Kohesi merupakan gaya tarik menarik antar partikel tanah. Perkiraan nilai kohesi tanah lunak menurut Braja M. Das (1998) dijelaskan pada Tabel 2.9 berikut.

Tabel 2.9 Nilai Kohesi Tanah

Konsistensi tanah	Kohesi (kN/m ²)
Sangat lunak	0-12,5
Lunak	12,5-25
Sedang	25-50
Kaku	50-100
Sangat Kaku	100-200
Keras	> 200

(Sumber: Das, 1998)

2.2 Perkerasan Jalan

Menurut Totomihardjo (2004), lapis perkerasan jalan memiliki peran penting sebagai perantara yang mendistribusikan beban lalu lintas ke tanah dasar. Dirancang dengan dimensi, ketebalan, kekuatan, dan stabilitas tertentu untuk memastikan perkerasan mampu menahan beban tanpa kerusakan signifikan selama penggunaannya. Jarang sekali tanah dasar yang

cukup kuat untuk menahan beban lalu lintas tanpa perkerasan. Oleh karena itu, perkerasan menjadi elemen penting dalam konstruksi jalan (Hardiyatmo, 2008). Perkerasan jalan memiliki peran penting dalam melindungi tanah dasar dan lapisan perkerasan di atasnya dari kerusakan akibat beban lalu lintas. Lapisan ini mendistribusikan beban roda kendaraan ke tanah dasar, sehingga dapat mereduksi tegangan dan regangan maksimum pada tanah dasar.

Secara umum, perkerasan memiliki tiga fungsi utama:

1. Merancang struktur yang kuat untuk menopang beban lalu lintas.
2. Mendistribusikan beban roda ke tanah dasar sehingga mengurangi tekanan pada tanah dasar dan mencegah kerusakan dini.
3. Memberikan permukaan jalan yang kasar dan tahan gelincir agar membantu meningkatkan cengkraman ban.

Terdapat tiga jenis perkerasan yang sangat umum digunakan yaitu perkerasan kaku (*rigid pavement*), perkerasan lentur (*flexible pavement*), dan perkerasan komposit (*composite pavement*). Perbedaan utama dari ketiga lapisan ini terletak pada material dan cara kerja perkerasan dalam mendistribusikan beban ke seluruh lapisannya sehingga mampu meredam tekanan dan *displacement*. Perkerasan kaku terbuat dari pelat beton yang kaku dan kuat. Perkerasan ini bekerja dengan cara mendistribusikan beban ke tanah dasar melalui plat beton, sehingga mampu menahan beban yang berat tanpa mengalami *displacement* sedangkan perkerasan lentur menggunakan material utama aspal dengan campuran agregat batu pecah, pasir, dan material pengisi lainnya. Perkerasan komposit menggabungkan penggunaan kedua material yaitu aspal dan pelat beton. Selanjutnya diberikan pembahasan lebih lanjut mengenai literatur yang mendukung teori terkait dengan penelitian terdahulu yang dapat merujuk pada penelitian ini.

2.2.1 Perkerasan Kaku

Lapis perkerasan kaku merupakan struktur perkerasan jalan yang menggunakan beton sebagai bahan utamanya yang tersusun atas pelat beton yang menerus (bersambung) tanpa/dengan tulangan,

menerus dengan tulangan, atau beton prategang (DEPKIMPRASWIL, 2003). Perkerasan kaku dirancang agar dapat memikul beban lalu lintas secara aman dan nyaman serta tidak terjadi kerusakan fatal dalam umur yang direncanakan. Untuk dapat memenuhi fungsi tersebut maka perkerasan kaku harus :

1. Mereduksi tegangan yang terjadi pada tanah dasar akibat beban lalu lintas sampai batas-batas yang dapat ditoleransi pada perbedaan penurunan atau lendutan.
2. Mampu mengatasi kembang susut dan penurunan kekuatan tanah dasar, serta pengaruh cuaca dan kondisi lingkungan.

2.2.2 Pengaruh Tanah Dasar Lunak pada Kinerja Perkerasan Jalan

Kualitas tanah dasar yang buruk dapat menjadi faktor penentu kegagalan desain perkerasan jalan meskipun telah dirancang dengan matang . Sebagai elemen fundamental yang menopang seluruh struktur perkerasan, kinerja tanah dasar sangatlah krusial. Tanah dasar yang lunak tidak mampu menahan dan mendistribusikan beban kendaraan dengan baik. Akibatnya terjadi *displacement* yang berlebih dan tidak dapat ditoleransi. Penurunan ini jarang terjadi secara seragam, sehingga retak-retak (*cracking*) pada pelat dan gangguan kinerja perkerasan pun tak terelakkan. Berikut beberapa permasalahan yang umumnya muncul akibat tanah dasar lunak pada konstruksi perkerasan:

1. Penurunan permukaan jalan yang tidak terkontrol
2. Retak-retak (*cracking*) pada pelat
3. Permukaan jalan yang tidak rata dan bergelombang, serta lubang-lubang yang terbentuk akibat *displacement*, mengganggu kenyamanan pengguna jalan dan membahayakan keselamatan.
4. Daya Dukung Rendah yang disebabkan oleh kapasitas tanah dasar yang lemah untuk menahan beban lalu lintas

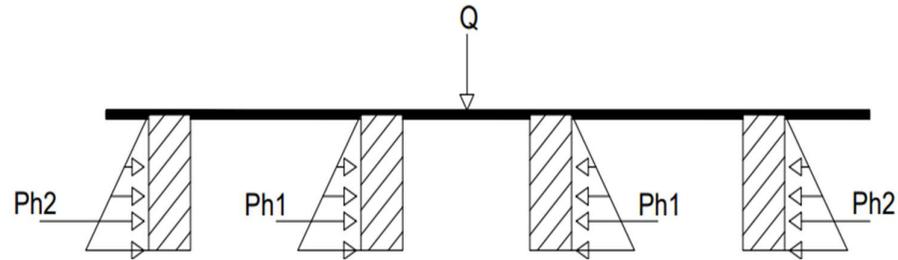
Oleh karena itu, analisis yang tepat terhadap tanah dasar merupakan aspek krusial dalam desain dan konstruksi perkerasan jalan. Upaya stabilisasi dan peningkatan daya dukung tanah dasar menjadi kunci untuk memastikan kinerja perkerasan yang optimal dan tahan lama.

2.3 Sistem Perkerasan Cakar Ayam Prof. Sedyatmo

Sistem Perkerasan Cakar Ayam (CA) ditemukan pada tahun 1961 oleh Prof. Sedyatmo. Sistem ini digunakan pertama kali untuk fondasi bangunan menara listrik tegangan tinggi di daerah Ancol yang tanahnya lunak berupa rawa-rawa. Selain itu, fondasi sistem cakar ayam juga digunakan untuk berbagai perkerasan jalan dan fondasi bangunan. Sistem cakar ayam banyak diaplikasikan pada tanah lunak karena menurut (Hardiyatmo, 2006) dalam (Suhendro dan Hardiyatmo, 2010) pada prinsipnya sistem fondasi cakar ayam dapat digunakan pada tanah dengan kapasitas dukung 1,5-3,5 ton/m². (Suhendro dan Hardiyatmo, 2010) menyatakan sistem cakar ayam yang digunakan pada perkerasan lapangan terbang antara lain sebagai *runway*, *taxi way*, dan *apron* di Bandara Soekarno Hatta-Jakarta, Bandara Juanda-Surabaya, *runway* di Bandara Polonia-Medan telah menunjukkan keberhasilannya. Sistem fondasi ini telah terbukti berfungsi baik dalam selama lebih dari 27 tahun tanpa kerusakan yang berarti dan biaya perawatannya relatif rendah. Sebagai perkerasan jalan, sistem cakar ayam tersebut juga menunjukkan keberhasilannya sebagai *access road* sepanjang 13,5 km yang menghubungkan Jakarta-Bandara Soekarno Hatta, dan beberapa ruas jalan tol Kampung Kayan-Sitiawan di Malaysia maupun beberapa ruas jalan tol Simpang X-Taman Peringggit Jala di Malaka, Malaysia, yang semua dibangun diatas tanah yang relatif lunak dan telah berfungsi baik selama lebih dari 27 tahun.

Menurut Sedyatmo (1986) dalam Mulu (2007), sistem fondasi cakar ayam bekerja dengan memanfaatkan tekanan tanah lateral pada sisi-sisi pipa cakar yang ada di bawah pelat sehingga pipa cakar ayam selalu dalam kondisi

vertikal ketika dibebani dan memberikan kekakuan pada pelat di atasnya. Prinsip dasar ini dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Prinsip dasar fondasi cakar ayam sediyatmo (Muhu, 2007)

Kekakuan pelat pada fondasi sistem cakar ayam dikarenakan pipa-pipa pada cakar diletakkan pada kedalaman tidak mencapai tanah keras, namun kombinasi antara pipa dan pelat yang monolit di dalam tanah membuat sistem ini menjadi konstruksi yang cenderung kaku dan kuat sehingga tidak mudah untuk bengkok. Menurut (Suhendro dan Hardiyatmo, 2010), umumnya perkerasan cakar ayam terdiri dari pelat beton bertulang dengan tebal 10-17 cm yang diperkaku dengan pipa-pipa beton (cakar) berdiameter 120 cm, tebal 8 cm, dan Panjang pipa 150-200 cm, yang ditanam pada tahapan subgrade, dengan jarak pipa-pipa berkisar 2-2,5 m. Perhitungan sistem cakar ayam oleh Prof. Sedyatmo ini tidak pernah terungkap/terpublikasi. Sistem ini dirancang lebih didasarkan pada pemikiran yang cermat, pengalaman yang matang. Belakangan sistem cakar ayam ini diperkuat dengan pendekatan eksperimental melalui beberapa percobaan lapangan (*full scale experimental test*) di apron Bandara Juanda-Surabaya, *runway* Bandara Polandia-Medan, dan *runway* Bandara Soekarno Hatta (Suhendro dan Hardiyatmo, 2010).

2.4 Efisiensi Bentuk *Honeycomb*

Efisiensi pada bentuk *honeycomb* mencerminkan sejarah panjang dan relevansi struktur heksagonal pada sarang lebah dalam kerangka penelitian yang lebih luas. Pengamatan dan apresiasi terhadap arsitektur sarang lebah selama ribuan tahun memberikan landasan bagi pertanyaan-pertanyaan

filosofis dan teknis yang mendalam. Sejumlah pemikir, termasuk Pappus dari Aleksandria dan Charles Darwin, telah menyajikan perspektif yang beragam terkait dengan struktur ini. Pappus menekankan simetri ilahi dalam penciptaan lebah, sedangkan Darwin mengakui sarang lebah sebagai suatu mahakarya teknik yang secara efisien menghemat tenaga kerja dan lilin. Dalam konteks matematis, penelitian ini merinci pandangan Jan Brożek, seorang polimatik Polandia, yang pada abad ke-17 mengemukakan bahwa heksagonalitas sarang lebah menghasilkan bidang dengan batas minimal. Konsep ini akhirnya mendapat resolusi positif melalui kerja keras Thomas Hales pada tahun 1998.

Perumusan matematis pada bentuk *honeycomb* muncul karena dugaan Kepler atau Masalah Bola Meriam, di mana struktur heksagonal juga muncul sebagai kunci untuk memahami kepadatan optimal dalam penumpukan bola seragam. Proyek Hales mencakup aplikasi matematika dari penyelesaian dugaan Kepler ke dugaan sarang lebah, dengan fokus pada pengepakan rapat dan pengelolaan sumber daya dalam konteks ruang tiga dimensi. Bukti matematis ini akhirnya diterima oleh komunitas ilmiah, menegaskan kontribusi signifikan dari metode dan pemikiran matematis dalam memecahkan tantangan kompleks.

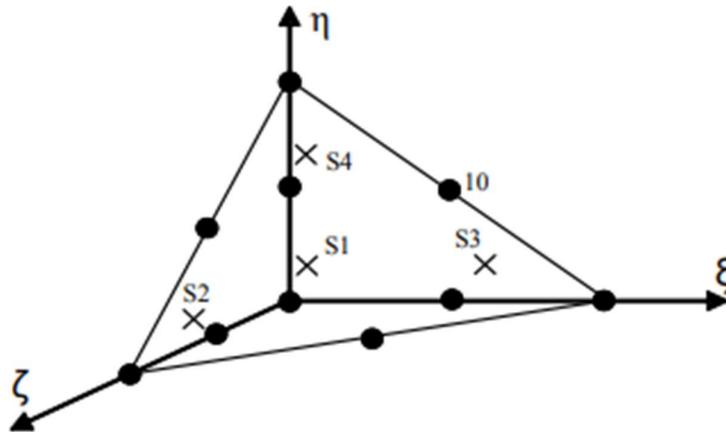
2.5 Metode Elemen Hingga 3 Dimensi

Metode Elemen Hingga atau *Finite Element Method* (FEM) merupakan analisis numerik yang banyak digunakan dalam berbagai bidang ilmu teknik, termasuk geoteknik. FEM memungkinkan para ahli geoteknik untuk menyelesaikan berbagai permasalahan terkait *displacement*, tegangan, regangan, dan lain sebagainya. Perkembangan teknologi dan software yang semakin mutakhir telah mempermudah dan mempercepat proses simulasi desain teknik menggunakan metode elemen hingga (Suhendro, 2000). Peningkatan kemampuan komputasi memungkinkan analisis terhadap permasalahan teknik yang lebih besar dan kompleks. Langkah-langkah

dalam analisis metode elemen hingga antara lain sebagai berikut (Suhendro, 2000).

1. Diskritisasi dan penentuan tipe elemen

Dalam geoteknik, diskritisasi merupakan sebuah langkah krusial dalam analisis geoteknis. Proses ini melibatkan pembagian elemen yang akan dianalisis menjadi elemen-elemen yang lebih kecil dengan batas tertentu. Hal ini bertujuan untuk menyederhanakan analisis dan meningkatkan akurasi hasil. Proses diskritisasi menghasilkan tiga komponen baru: nodal, elemen, dan garis nodal. Bentuk elemen pada setiap bidang dapat berbeda-beda tergantung pada proyeksi material terhadap sumbu koordinat. Elemen garis digunakan untuk material satu dimensi (1D). Elemen segitiga digunakan untuk material dua dimensi (2D), seperti plat atau lembaran. Sedangkan elemen tetrahedral digunakan untuk material tiga dimensi (3D). Gambar diskritisasi elemen dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3 Diskritisasi elemen 3D

2. Penentuan fungsi perpindahan

Pada setiap elemen yang terbentuk 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-*displacement*
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.

Proses analisis dengan metode elemen hingga pada penelitian ini akan dibantu dengan *software* geoteknik yaitu Plaxis 3D. Berikutnya akan dijelaskan mengenai aplikasi ini serta teori dan metode yang ada pada *software* Plaxis 3D dalam mendukung penelitian ini.

2.5.1 *Software Plaxis*

Software Plaxis merupakan aplikasi dapat menganalisis berbagai bentuk geometris, memudahkan untuk menghitung finite element dengan sangat cepat. Tampilan Plaxis berupa grafis yang membuat pengguna lebih familiar dalam melakukan perhitungan. Input yang disediakan dalam program ini meliputi semua yang dibutuhkan dalam perhitungan manual, seperti: dimensi dan material (*material model, material type, general properties, permeability, stiffness/kekakuan, kekuatan*). dalam tahap kalkulasi suatu model, program Plaxis tersedia baik dalam dua dimensi (2D) maupun tiga dimensi (3D) yang dapat menampilkan grafik sehingga memudahkan para pengguna untuk melakukan perhitungan secara bertahap dan outputnya yang menarik sehingga dapat langsung

diaplikasikan dengan mudah untuk suatu presentasi. Hal yang sangat penting untuk diperhatikan pada *software* Plaxis 3D untuk menunjang penelitian dalam bidang geoteknik adalah diskritisasi elemen 3D, model material, serta hubungan antarmuka (*interface*) antara material tanah dan material non tanah yang akan diaplikasikan oleh *software*.

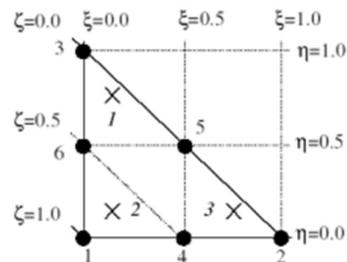
2.5.2 Diskritisasi Elemen pada Plaxis 3D

Basis diskritisasi elemen untuk seluruh elemen tipe luasan (area) dan permukaan (*surface*) berasal dari pengembangan *software* Plaxis 2D. Pada 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 material tanah pada analisis 2D dan digunakan untuk meshing material pelat pada model 3D (Bentley Scientific Manual, 2022). 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 (ζ dan η). Selain itu, digunakan koordinat bantu $\xi=1-\zeta-\eta$. Elemen segitiga 6-node menyediakan interpolasi perpindahan orde kedua. Fungsi bentuk N_i memiliki sifat di mana nilai fungsi sama dengan satu di nodal i dan nol di nodal lainnya. Fungsi bentuk dan ilustrasi 6 nodal ditunjukkan pada Gambar 2.4 berikut :

$$\begin{aligned} N_1 &= \zeta(2\zeta-1) \\ N_2 &= \zeta(2\zeta-1) \\ N_3 &= \eta(2\eta-1) \\ N_4 &= 4\zeta\zeta \\ N_5 &= 4\zeta\eta \\ N_6 &= 4\eta\zeta \end{aligned}$$

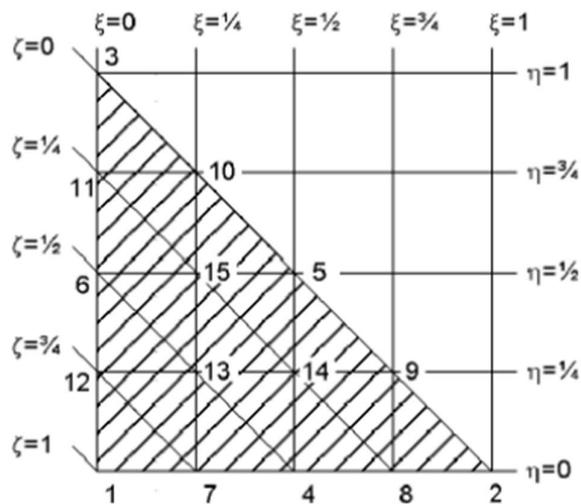


Gambar 2.4 Fungsi bentuk, penomoran, posisi nodal lokal (\bullet), titik integrasi (x) dan ilustrasi dari elemen segitiga 6 nodal

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 dan ilustrasi 15 nodal dapat dilihat pada Gambar 2.5 berikut (Plaxis 3D Scientific Manual, 2023)

$$\begin{aligned}
 N_1 &= \zeta(4\zeta-1)(4\zeta-2)(4\zeta-3)/6 \\
 N_2 &= \xi(4\xi-1)(4\xi-2)(4\xi-3)/6 \\
 N_3 &= \eta(4\eta-1)(4\eta-2)(4\eta-3)/6 \\
 N_4 &= 4\zeta\xi(4\zeta-1)(4\xi-1) \\
 N_5 &= 4\xi\eta(4\xi-1)(4\eta-1) \\
 N_6 &= 4\eta\zeta(4\eta-1)(4\zeta-1) \\
 N_7 &= 8\zeta\xi(4\zeta-1)(4\zeta-2)/3 \\
 N_8 &= 8\zeta\xi(4\xi-1)(4\xi-2)/3 \\
 N_9 &= 8\eta\xi(4\xi-1)(4\xi-2)/3 \\
 N_{10} &= 8\zeta\eta(4\eta-1)(4\eta-2)/3 \\
 N_{11} &= 8\zeta\eta(4\eta-1)(4\zeta-2)/3 \\
 N_{12} &= 8\eta\zeta(4\zeta-1)(4\zeta-2)/3 \\
 N_{13} &= 32\eta\xi\zeta(4\xi-1) \\
 N_{14} &= 32\eta\xi\zeta(4\xi-1) \\
 N_{15} &= 32\eta\xi\zeta(4\eta-1)
 \end{aligned}$$

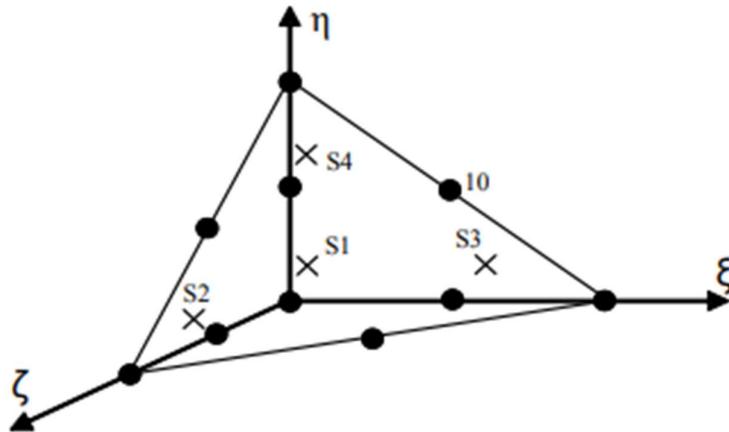


Gambar 2.5 Fungsi bentuk, penomoran dan ilustrasi elemen segitiga 15 nodal

3. Elemen tetrahedral 10 nodal (*15-node triangular element*)

Elemen tetrahedral 10 nodal dibuat dalam prosedur meshing 3D. Tipe elemen ini menyediakan interpolasi perpindahan orde kedua. Untuk elemen tetrahedral, terdapat tiga koordinat lokal (ξ , η dan ζ). Fungsi bentuk N_i memiliki sifat bahwa nilai fungsi sama dengan satu di node i dan nol di node lainnya. Fungsi bentuk elemen volume 10 nodal dan ilustrasi tetrahedral 10 nodal ditunjukkan pada Gambar 2.6 berikut.

$$\begin{aligned}
 N_1 &= (1-\xi-\eta-\zeta)(1-2\xi-2\eta-2\zeta) \\
 N_2 &= \zeta(2\zeta-1) \\
 N_3 &= \xi(2\xi-1) \\
 N_4 &= \eta(2\eta-1) \\
 N_5 &= 4\zeta(1-\xi-\eta-\zeta) \\
 N_6 &= 4\xi\zeta \\
 N_7 &= 4\xi(1-\xi-\eta-\zeta) \\
 N_8 &= 4\zeta\zeta(1-\xi-\eta-\zeta) \\
 N_9 &= 4\eta\zeta \\
 N_{10} &= 4\xi\eta
 \end{aligned}$$



Gambar 2.6 Fungsi bentuk, penomoran dan ilustrasi elemen tetrahedral 10 nodal

Elemen tanah memiliki tiga derajat kebebasan per nodal yaitu: u_x , u_y , dan u_z . Matriks fungsi bentuk N_i sekarang dapat didefinisikan sebagai:

$$N_i = \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix} \dots\dots\dots \text{(Pers. 2.2)}$$

dan vektor perpindahan nodal v_i didefinisikan sebagai:

$$v_i = [v_{ix} \ v_{iy} \ v_{iz}]^T \dots\dots\dots \text{(Pers. 2.3)}$$

Segitiga dengan 10 nodal merupakan elemen yang akurat yang menghasilkan tegangan dengan kualitas yang baik untuk masalah yang kompleks.

2.5.3 Model Material Mohr-Coulomb Tanah pada Aplikasi Plaxis 3D

Perilaku non-linear tanah merupakan fenomena kompleks yang diakibatkan oleh interaksi antar partikel tanah dan pengaruh berbagai faktor eksternal. Ketika tanah mengalami perubahan tegangan atau regangan, kekakuannya tidak konstan dan berubah tergantung pada beberapa faktor, seperti:

- Tingkat tegangan: Semakin tinggi tegangan yang diaplikasikan, semakin kaku tanahnya.
- Jalur tegangan: Riwayat pembebanan dan arah tegangan mempengaruhi sifat non-linear tanah.
- Tingkat regangan: *Displacement* tanah yang terjadi non-proporsional dengan tegangan yang diberikan.

Model tanah lanjutan dalam aplikasi Plaxis 3D, seperti Mohr-Coulomb, hardening soil, dan soft soil, mampu merepresentasikan sifat non-linear tanah dengan kompleksitas yang berbeda-beda.

Pada penelitian ini, model Mohr-Coulomb dipilih karena merupakan model dasar yang sering digunakan dalam analisis teknik sipil khususnya tingkat sarjana. Model ini mempertimbangkan parameter-parameter seperti sudut geser dalam dan kohesi tanah untuk memprediksi perilaku tanah pada kondisi runtuh.

Penggunaan model tanah Mohr-Coulomb dalam Plaxis 3D memungkinkan para insinyur untuk memodelkan perilaku tanah yang lebih realistis dan mendapatkan desain yang lebih optimal. Pada penelitian ini, tanah dimodelkan dengan model Mohr-Coulomb dikarenakan model ini merupakan model dasar dari penyederhanaan tanah yang dipelajari di perkuliahan S1. Selanjutnya akan dijelaskan teori mengenai model Mohr-Coulomb.

- Mohr-Coulomb

Model material untuk tanah dan batuan umumnya diungkapkan sebagai hubungan antara peningkatan tegangan efektif dan peningkatan regangan. Hubungan ini dapat diungkapkan dalam rumus:

$$\underline{\sigma} = M \cdot \underline{\varepsilon} \dots\dots\dots \text{(Pers. 2.4)}$$

Dimana notasi “ M ” adalah matriks kekakuan material. Model material paling sederhana yaitu Mohr-Coulomb didasarkan pada hukum Hooke untuk perilaku elastis linear isotropik. Model ini yang disebut dengan model Elastis Linear, tetapi juga merupakan dasar dari model lainnya. Hukum Hooke dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{bmatrix} = \frac{E'}{(1-2\nu')(1+\nu')} \begin{bmatrix} 1-\nu' & \nu' & \nu' & 0 & 0 & 0 \\ \nu' & 1-\nu' & \nu' & 0 & 0 & 0 \\ \nu' & \nu' & 1-\nu' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{bmatrix} \dots\dots \text{(Pers. 2.5)}$$

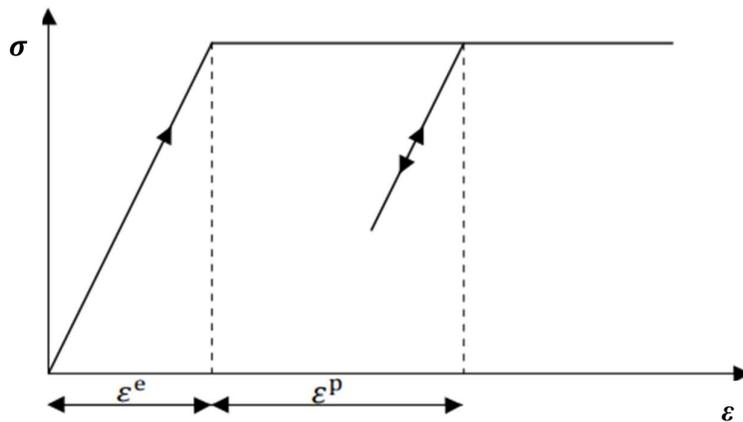
Matriks kekakuan material elastis biasanya Dua parameter yang digunakan dalam model ini, yaitu modulus *Young* (E), dan rasio *Poisson* efektif (ν), Kondisi material elastis dapat dicari. dengan menggunakan modulus geser (G) dan bulk modulus (K). Sebagai berikut:

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

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

Prinsip dasar dari sifat elastoplastis adalah bahwa regangan dan laju regangan didekomposisi menjadi bagian elastis dan bagian plastis.

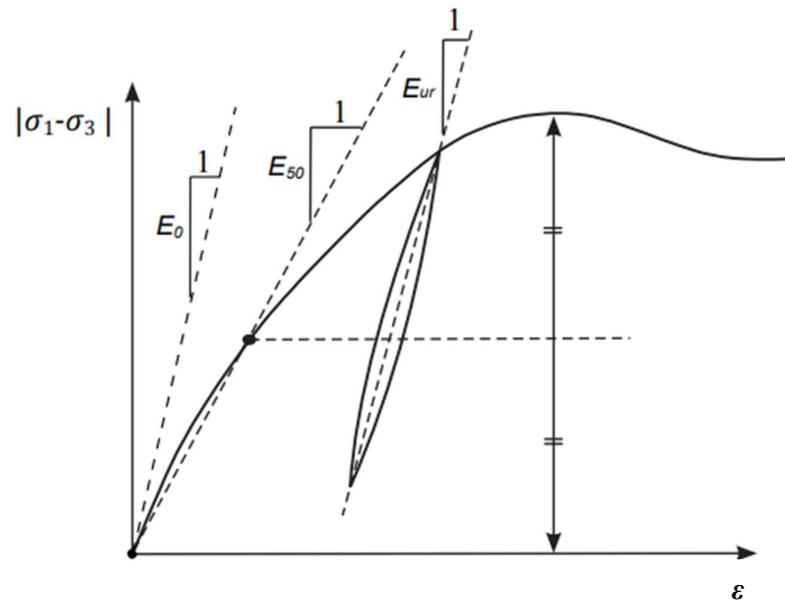
$$\underline{\varepsilon} = \underline{\varepsilon}^e + \underline{\varepsilon}^p \dots \dots \dots \text{(Pers. 2.8)}$$



Gambar 2.7 Ide dasar model linear elastis sempurna

Linear elastis sempurna model Mohr-Coulomb merupakan penyederhanaan dari perilaku elastoplastis tanah yang sebenarnya (Potts dan Zdravkovic, 1999). Gambar 2.7 menjelaskan bahwa saat tanah diberi beban maka tanah akan melalui beberapa fase yaitu fase elastis yang kemudian menjadi plastis sempurna. Fase elastis merupakan fase dimana tanah bisa

kembali ke keadaan semula. Fase plastis adalah fase dimana tanah tidak bisa kembali ke keadaan semula dan akan mengalami regangan terus menerus sehingga saat mencapai fase plastis maka tanah akan diberikan perilaku pelepasan beban (*unloading*) yang kemudian diberikan beban lagi (*loading*) untuk kemudian hasilnya diinput ke aplikasi bantuan analisis geoteknik sebagai spesifikasi material tanah walaupun sejatinya model Mohr-Coulomb merupakan model dasar yang tidak menggambarkan perilaku tanah yang sebenarnya. Model yang mendekati perilaku tanah yang sebenarnya adalah model non-linear tanah seperti pada Gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.8 Model non-linear tanah

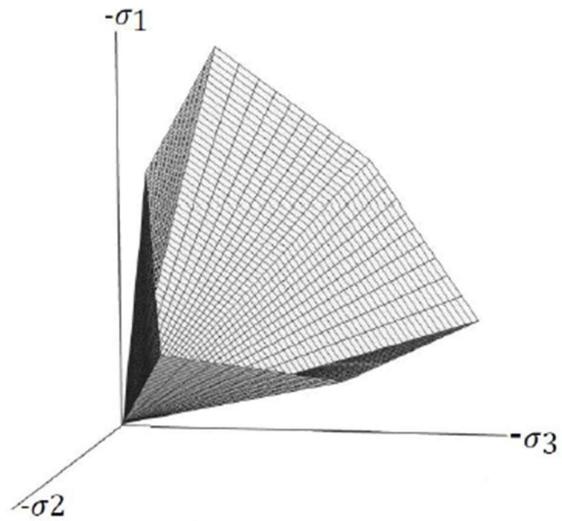
Pada model non-linear di atas ditunjukkan perilaku elastoplastis yang sejatinya menggambarkan perilaku tanah yang sebenarnya (Potts dan Zdravkovic, 1999). Pada Gambar 2.8 dijelaskan bahwa sebenarnya setelah diberi beban, maka tanah tidak akan kembali ke keadaan semula tetapi elastis dan plastis secara bersamaan. Dimulai dari saat pertama pembebanan maka akan diketahui modulus *young* tanah tersebut. data inilah yang nantinya akan menjadi data E_0 yaitu data modulus *young* awal.

Seiring dengan tanah diberi beban, saat kekuatan modulus tanah mencapai 50% maka akan dicatat juga datanya yang dilambangkan dengan data E_{50} . Kemudian akan dilakukan pelepasan beban (*unloading*) yang kemudian diberikan beban lagi (*loading*). Perilaku pelepasan dan pemberian beban kembali ini akan membentuk sudut yang nantinya akan menjadi data E_{ur} . Data inilah yang kemudian hasilnya akan diinput ke aplikasi geoteknik untuk mendefinisikan material lanjutan dari model Mohr-Coulomb yaitu model *Hardening Soil*.

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 yaitu.

$$\begin{aligned}
 f_{1a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin(\phi) - c \cos(\phi) \leq 0 \\
 f_{2a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_2) \sin(\phi) - c \cos(\phi) \leq 0 \\
 f_{2a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin(\phi) - c \cos(\phi) \leq 0 \dots\dots\dots (\text{Pers. 2.9}) \\
 f_{2b} &= \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin(\phi) - c \cos(\phi) \leq 0 \\
 f_{3a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin(\phi) - c \cos(\phi) \leq 0 \\
 f_{3b} &= \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_1) \sin(\phi) - c \cos(\phi) \leq 0
 \end{aligned}$$

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 2.9 berikut.



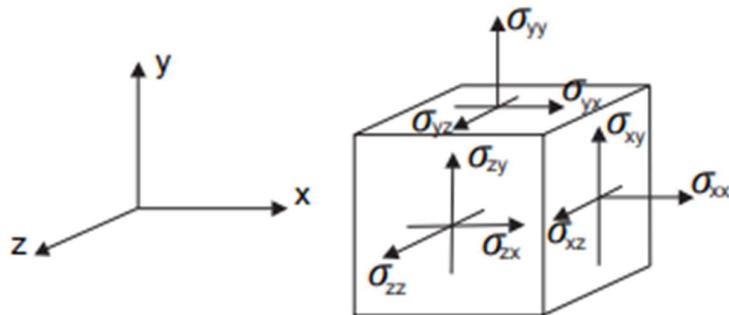
Gambar 2.9 Fungsi leleh Mohr-Coulomb dalam ruang *principal stress*

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

1. Modulus *Young* (E)
2. *Poisson Ratio* (ν)
3. Sudut gesek internal (ϕ)
4. Kohesi (c)
5. Sudut dilatasi (ψ)

2.5.4 Tegangan pada Plaxis 3D

Tegangan adalah tensor yang dapat direpresentasikan oleh matriks dalam koordinat Kartesius.



Gambar 2.10 Sistem koordinat tiga dimensi umum dan konvensi tanda untuk tegangan (Bentley Reference Manual, 2022)

Dalam teori *displacement* standar, tensor tegangan bersifat simetris sehingga $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$, $\sigma_{yz} = \sigma_{zy}$, dan $\sigma_{zx} = \sigma_{xz}$. Dalam situasi ini, tegangan sering ditulis dalam notasi vektor yang melibatkan enam komponen berbeda yaitu :

$$\underline{\sigma} = (\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \sigma_{zz} \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{zx})^T \dots\dots\dots \text{(Pers. 2.10)}$$

2.5.5 Regangan pada Plaxis 3D

Regangan adalah tensor yang dapat direpresentasikan oleh matriks dalam koordinat Kartesius.

$$\underline{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \dots\dots\dots \text{(Pers. 2.11)}$$

Regangan adalah turunan dari komponen perpindahan, yaitu:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial j} + \frac{\partial u_j}{\partial i} \right) \dots\dots\dots \text{(Pers. 2.12)}$$

Dimana i dan j dapat dinotasikan sebagai x, y dan z.

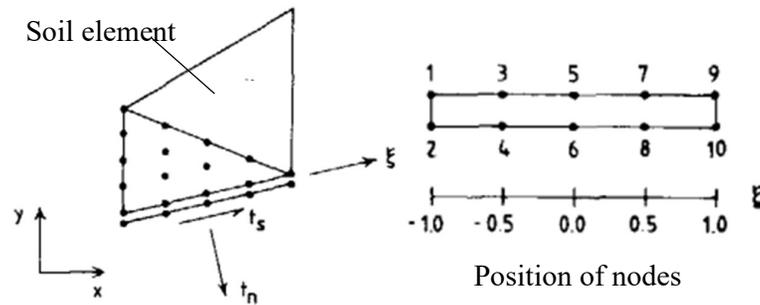
regangan ditulis dalam notasi vektor, yang hanya melibatkan enam komponen yang berbeda yaitu.

$$\underline{\varepsilon} = (\varepsilon_{xx} \ \varepsilon_{yy} \ \varepsilon_{zz} \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx})^T \dots\dots\dots \text{(Pers. 2.13)}$$

2.5.6 Interface pada Plaxis 3D

Elemen *interface* pada aplikasi Plaxis 3D merupakan elemen yang digunakan untuk memodelkan interaksi antara struktur dan tanah. Elemen ini berbentuk pasangan nodal yang 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 adanya perpindahan diferensial antara pasangan

nodal yang menghasilkan celah tipis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11 berikut.

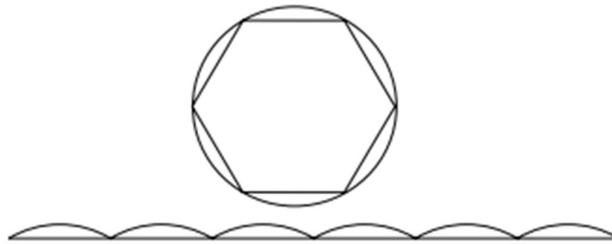


Gambar 2.11 Geometri elemen *interface*

2.6 Penelitian Terdahulu

1) Penelitian mengenai bentuk *honeycomb*

Penelitian yang terkait dengan penggunaan fondasi cakar ayam dalam mendukung perkuatan badan jalan sudah banyak dilakukan, namun belum ada yang spesifik membahas fondasi cakar ayam yang berbentuk *honeycomb*. Ide untuk bentuk *honeycomb* terpikir setelah membaca jurnal (Hales, 2001) yang menyatakan bahwa cara yang paling efisien untuk memaksimalkan volume adalah melalui bentuk heksagonal teratur. Di antara semua bentuk dua dimensi ruang menjadi sel-sel dengan luas sama, struktur heksagonal (sarang lebah) memiliki rasio keliling terhadap luas terkecil. Penelitian inilah yang menjadi dasar untuk variasi bentuk *honeycomb*. Penghematan ruang yang terjadi ditunjukkan pada Gambar 2.12 berikut.

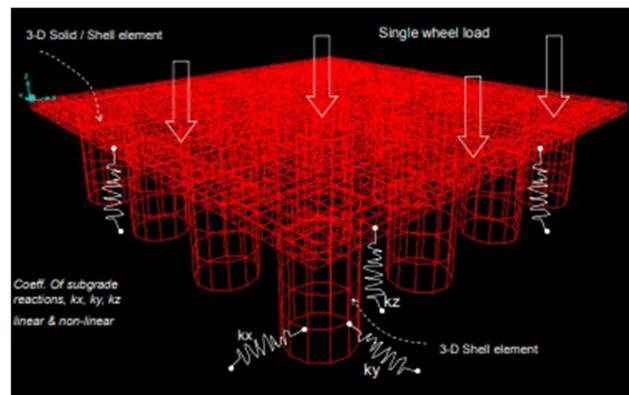


Gambar 2.12 Penghematan ruang dengan bentuk *honeycomb*

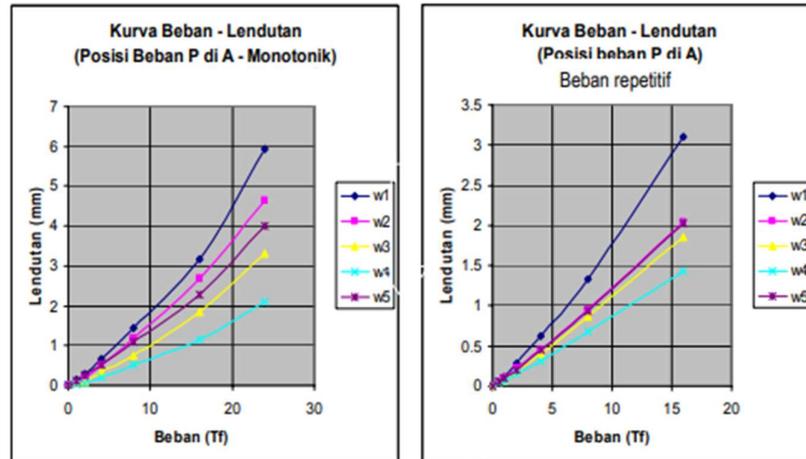
2) Penelitian Cakar Ayam Modifikasi (CAM) pada Tanah Lunak oleh Suhendro dan Hardiyatmo (2010)

Suhendro dan Hardiyatmo (2010) dalam penelitiannya yang berjudul "Sistem Perkerasan Cakar Ayam Modifikasi (CAM) Sebagai Alternatif Solusi Konstruksi Jalan di Atas Tanah Lunak" menawarkan solusi inovatif untuk perkerasan jalan di atas tanah lunak. Mereka memodifikasi sistem perkerasan cakar ayam tradisional dengan mengganti material beton dengan baja galvanis. Modifikasi ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja dan ketahanan perkerasan di atas tanah yang mudah mengalami penurunan dan *displacement*. Sistem CAM dianalisis menggunakan metode elemen hingga tiga dimensi, yang mempertimbangkan interaksi antara perkerasan dan tanah dasar. Penelitian ini juga melibatkan uji coba skala penuh di lapangan untuk memvalidasi hasil analisis dan menunjukkan efektivitas sistem CAM. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem CAM mampu meningkatkan daya dukung dan stabilitas perkerasan secara signifikan.

Gambar 2.13 menunjukkan pemodelan yang dilakukan oleh Suhendro dan Hardiyatmo, yang menggambarkan geometri dan elemen-elemen sistem CAM. Gambar 2.15 menunjukkan hasil grafik uji coba skala penuh, yang menunjukkan kinerja sistem CAM. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa sistem CAM merupakan solusi yang menjanjikan untuk perkerasan jalan di atas tanah lunak.



Gambar 2.13 Analisis metode elemen hingga oleh Suhendro dan Hardiyatmo (2010)

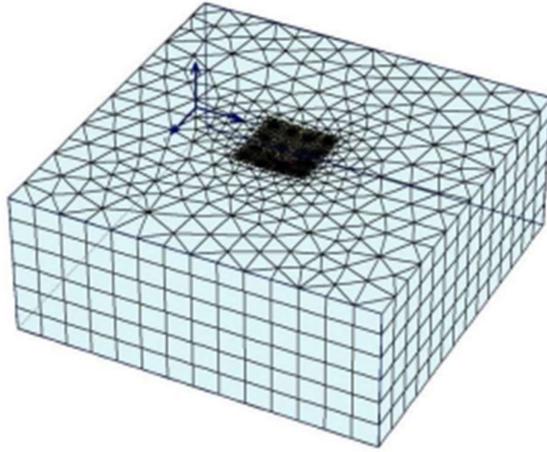


Gambar 2.14 Hasil grafik uji skala penuh metode CAM

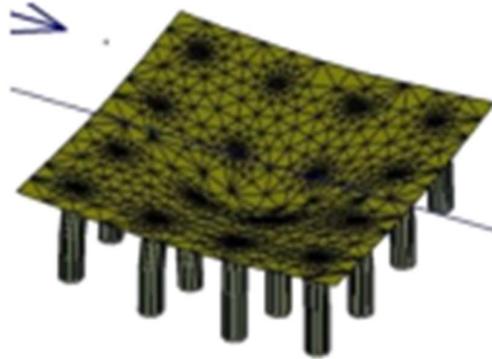
Hasil penelitian ini menyatakan bahwa sistem CAM ini layak untuk diaplikasikan dengan hasil lendutan maksimal sebesar 6 mm. perkerasan dengan sistem CAM sudah diaplikasikan ke jalan raya yang diantaranya jalan Pantura Pamanukan – Indramayu, jalan tol seksi 4 makassar, dan jalan Gudang smene PT Busowa, Samarinda.

3) Penelitian Pelat Terpaku pada Tanah Lunak oleh Puri (2015)

Puri (2015) dengan judul “Studi Parametrik Perkerasan Sistem Pelat Terpaku pada Tanah Lunak”. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan desain sistem pelat terpaku yang dapat mempunyai kinerja yang sebanding dengan sistem cakar ayam modifikasi, dengan beban dan dimensi pelat yang sama. Dimensi pelat yang digunakan dalam penelitian ini identik dengan Cakar Ayam Modifikasi (CAM) yang dijelaskan oleh Suhendro (2008), dan diameter tiang juga diatur sama. Variasi dilakukan pada panjang fondasi, dan cakar ayam dibuat lebih tipis. Analisis dilakukan terhadap pembebanan monoton pada posisi beban sentris dan pinggir yang ditunjukkan pada Gambar 2.15 berikut.



Gambar 2.15 Analisis metode elemen hingga oleh Puri (2015)



Gambar 2.16 Analisis metode elemen hingga oleh Puri (2015)
(lanjutan)

Hasil penelitian ini menyatakan bahwa perkerasan dengan sistem pelat terpaku memiliki kinerja yang mirip dengan sistem CAM. Tiang pendek di bawah perkerasan mempunyai peran sebagai penopang dan penahan pelat ketika terjadi beban lalu lintas. Bahkan, dengan dimensi pelat yang sama, kinerja sistem pelat terpaku lebih unggul dibandingkan dengan sistem CAM. Lendutan yang terjadi pada sistem pelat cenderung lebih kecil dibandingkan dengan sistem CAM, dan lendutan ini tersebar di sekitar area beban. Penambahan panjang atau pengurangan jarak antara paku juga meningkatkan kinerja sistem pelat terpaku.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Sampel Tanah

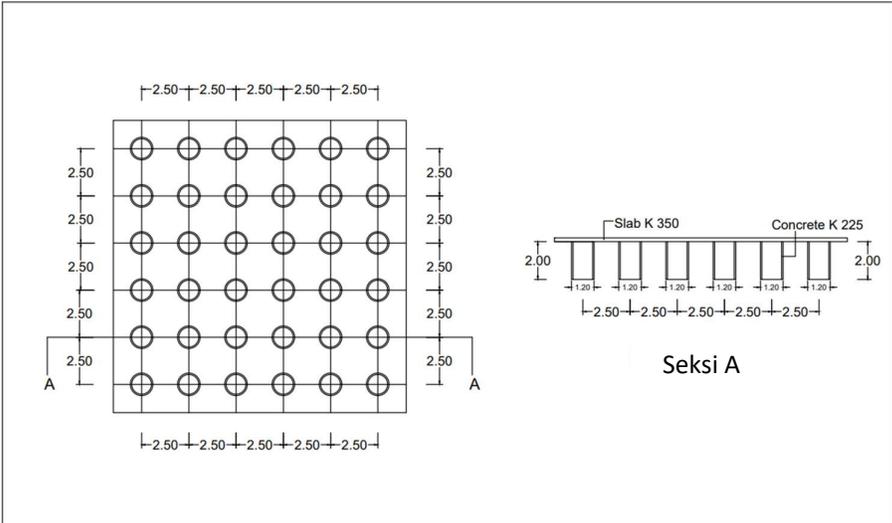
Penelitian ini menggunakan data sekunder berupa tanah lunak lempung di daerah Waru, Surabaya, Jawa Timur. Data tanah ini disamakan dengan data tanah lunak yang digunakan oleh Suhendro (2006). Data ini kemudian didefinisikan oleh Firdiansyah (2010) dan diperoleh sebagai berikut.

Tabel 3.1 Uji *Soil Properties* dan *Soil Engineering* Tanah Lunak Waru (Firdiansyah, 2010)

No	Parameter	Nama/ Simbol	Lempung Lunak Waru	Satuan
1	Model material	Model	Mohr-Coulomb	-
2	Perilaku material	Tipe	Undrained	-
3	Berat volume tak jenuh	γ	16	kN/m ³
4	Berat volume jenuh	γ_{sat}	17	kN/m ³
5	Modulus <i>young</i>	E	4.000	kN/m ²
6	Rasio <i>poisson</i>	ν	0,35	-
7	Kohesi	c	20	kN/m ²
8	Sudut gesek	ϕ	0	°
9	Sudut dimensi	ψ	0	°

3.3 Perbandingan pada Pengujian Cakar Ayam Bentuk *Honeycomb*

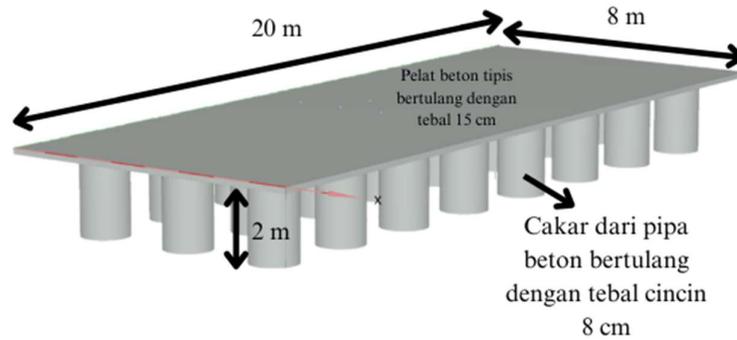
Tipikal cakar ayam Sedyatmo yang digunakan sebagai bahan perbandingan dengan model fondasi cakar ayam *honeycomb* mempunyai tebal pelat 15 cm yang diperkaku dengan pipa-pipa beton (cakar) berdiameter 120 cm, tebal 8 cm, dan panjang pipa 200 cm, yang ditanam dengan jarak pipa 2,5 m dengan material pelat beton menggunakan mutu K350 dan material fondasi cakar ayam menggunakan mutu K225. Tidak hanya itu, peneliti juga akan membandingkan dengan perletakan fondasi cakar ayam secara sejajar dan secara *zigzag*, untuk meneliti apakah fondasi ini bisa lebih efisien lagi. Tipikal cakar ayam Sedyatmo yang akan dimodelkan sebagai perbandingan dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.



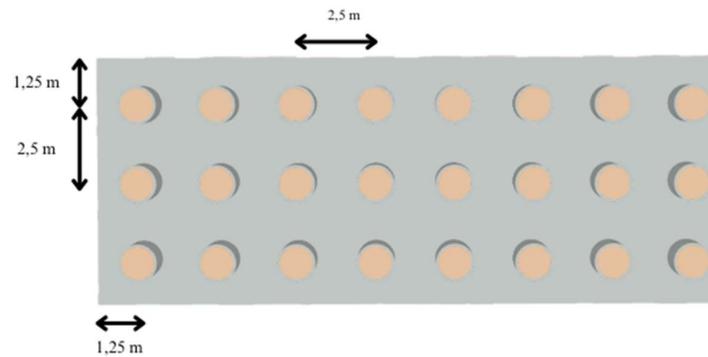
Gambar 3.1 Tipikal sistem perkerasan cakar ayam Sedyatmo (Suhendro dan Hardiyatmo, 2010)

Dalam penelitian ini, sistem cakar ayam yang digunakan dimodifikasi dalam hal dimensi pelat untuk menyesuaikan dengan lebar jalan dan panjang truk, bentuk cakar ayam yang berbentuk *honeycomb*, dan perletakan fondasi cakar ayam secara sejajar dan *zigzag* sebagai usulan baru pada penelitian ini. Dimensi pelat yang digunakan berukuran 8 x 20 m. Lebar 8 m digunakan untuk menyesuaikan dengan ukuran lebar badan 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

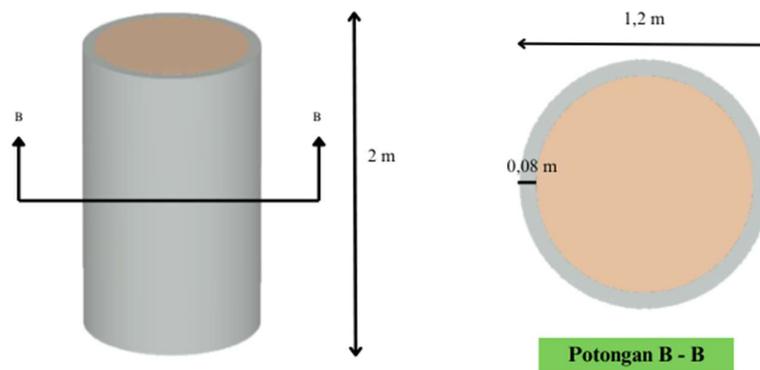
dengan ruang bebas di sekitarnya. Tipikal cakar ayam Sedyatmo yang akan dimodelkan sebagai pembanding dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut.



Tampak 3D Cakar Ayam Sedyatmo



Tampak Atas Cakar Ayam Sedyatmo



Gambar 3.2 Tipikal sistem perkerasan cakar ayam Sedyatmo yang akan dimodelkan

3.4 Tahapan Analisis

Analisis yang dilakukan pada penelitian ini yaitu analisis dengan tujuan mengetahui *displacement* untuk sistem fondasi cakar ayam bulat (konvensional) dan sistem fondasi cakar ayam model *honeycomb* dengan variasi perletakan yaitu paralel dan *zigzag* dan pembebanan di titik yang dianggap kritis.

a. Tahap Persiapan

Hal-hal yang dilakukan pada tahap awal analisis ini diantaranya adalah melakukan literatur terhadap perkembangan sistem fondasi cakar ayam pada perkerasan jalan, menentukan software yang akan digunakan dalam pemodelan, menentukan sumber data (primer/sekunder), alur kerja penelitian, dan sampel yang akan dimodelkan.

b. Tahap Pengumpulan Data

Pada tahap ini ditentukan data yang akan dimodelkan. Data penelitian menggunakan data sekunder dari penelitian CAM Suhendro pada tanah lunak Waru.

c. Tahap Permodelan 3D (Tiga Dimensi)

Pada tahap ini dilakukan analisis dan *input* yang sesuai data uji soil properties dan soil engineering yang telah didapatkan ke aplikasi Plaxis 3D, yang kemudian dimodelkan pelat, perletakan, dan fondasi cakar ayam dengan dimensi, model dan perletakan yang telah ditentukan, kemudian pembebanan tunggal diaplikasikan pada beberapa posisi.

d. Checking

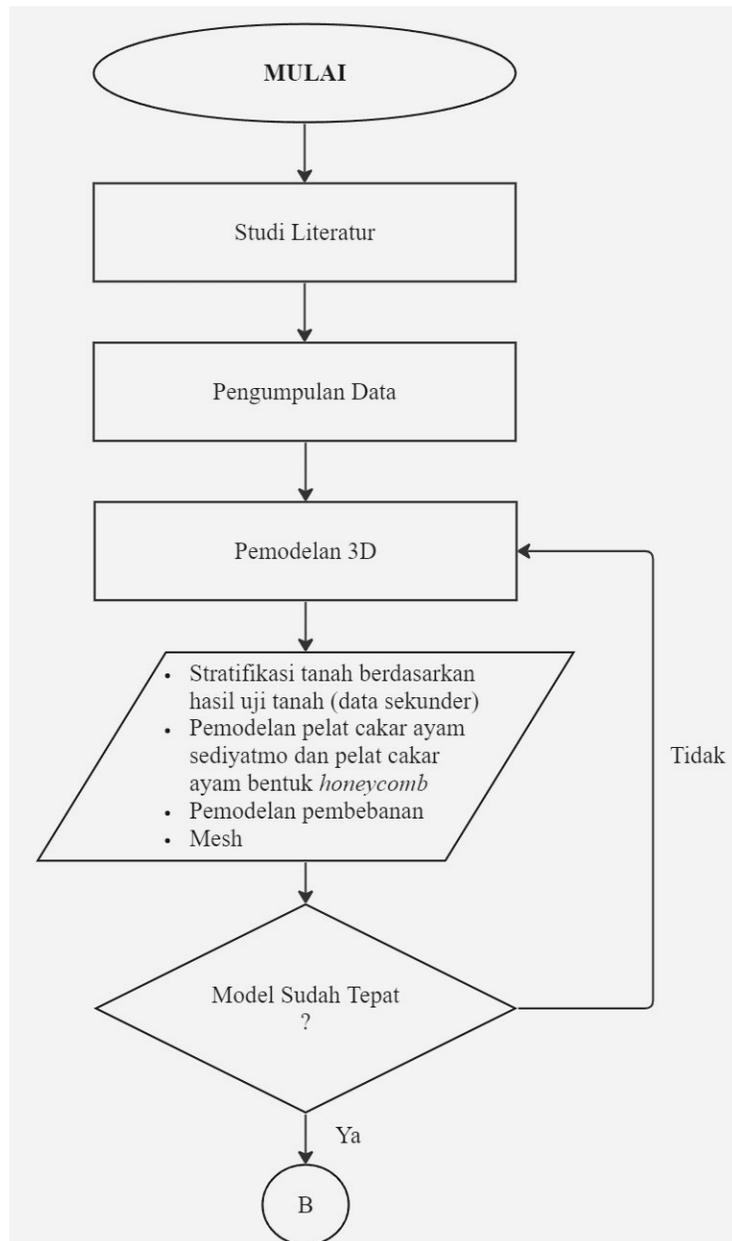
Selanjutnya dilakukan cek ulang untuk desain atau elemen-elemen desain yang sudah dimodelkan, jika terjadi kesalahan maka perlu dilakukan perbaikan pemodelan.

e. Running Analysis

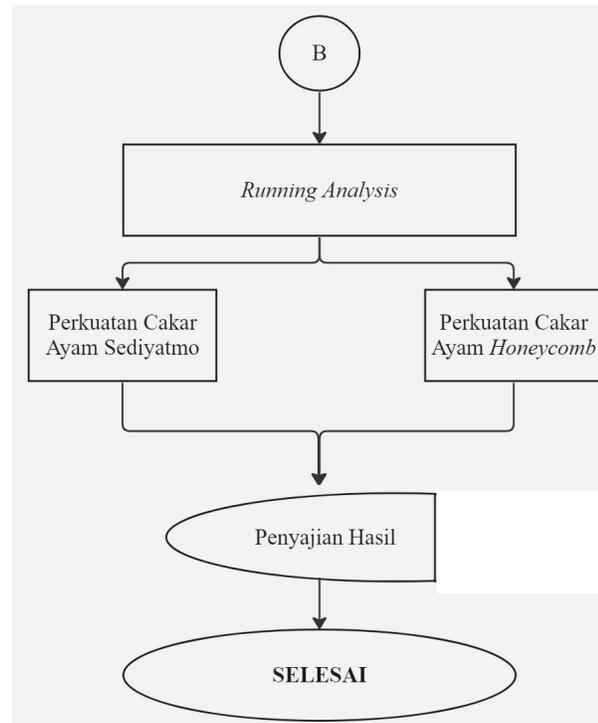
Tahapan ini merupakan analisis yang dibantu dengan program khusus geoteknik yaitu Plaxis 3D. Analisis ini dimulai dari pemodelan perkerasan kaku fondasi cakar ayam dengan perletakan yang diletakkan secara sejajar dan *zigzag*. Beban akan diaplikasikan di tengah fondasi,

di tepi fondasi, dan di antara fondasi, kemudian hasil lendutan pada pelat dianalisis.

Alur tahapan penelitian ini kemudian dijelaskan lebih lanjut dalam diagram alir (*flowchart*) pada Gambar 3.3 sebagai berikut.



Gambar 3.3 *Flowchart* penelitian



Gambar 3.4 *Flowchart* penelitian (lanjutan)

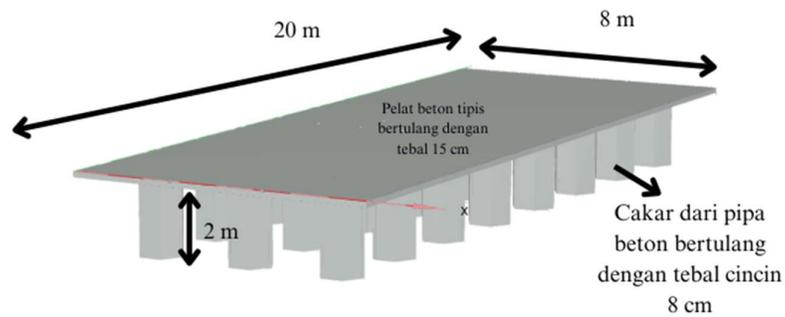
3.5 Penentuan Sampel

Dalam penelitian ini, digunakan beberapa sampel kontrol sebagai bahan perbandingan dan sampel variabel yang diubah dan diamati pengaruhnya. Dalam hal ini, bentuk fondasi, dan pola letak fondasi menjadi variabel yang diubah. Perilaku *displacement* pada pelat akibat pembebanan akan diamati. Beberapa hal yang menjadi variabel kontrol dan tidak diubah-ubah seperti :

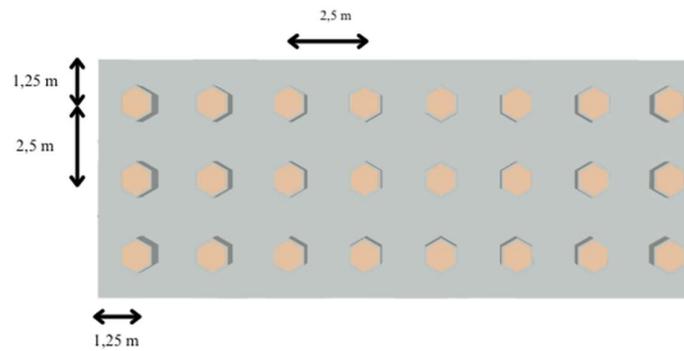
- | | |
|------------------------------------|----------|
| a. Panjang Pelat | = 20 m |
| b. Lebar Pelat | = 8 m |
| c. Tebal Pelat | = 0,15 m |
| d. Tebal cincin fondasi cakar ayam | = 0,08 m |
| e. Kuat Tekan Beton | = 25 MPa |

Dimensi pelat yang digunakan berukuran 8 x 20 m. Lebar 8 m digunakan untuk menyesuaikan dengan ukuran lebar dua lajur badan jalan arteri primer

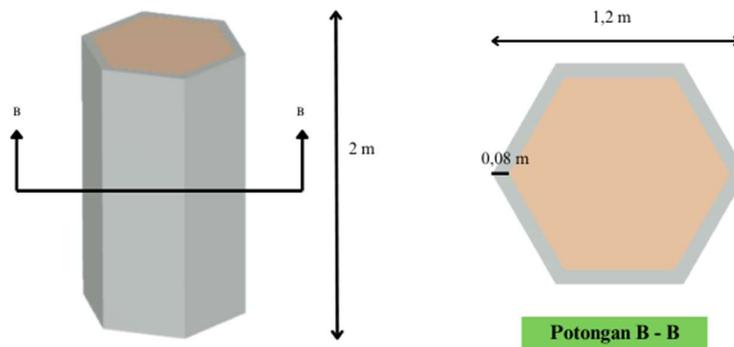
tipe 8/2 T pada Persyaratan Teknis Jalan PUPR. Panjang 20 m menyesuaikan ukuran panjang kendaraan truk pada SNI 1725-2016 untuk Pembebanan Jembatan dengan ruang bebas di sekitarnya. Selanjutnya, variabel yang terus diubah-ubah untuk melihat perilaku pelat yaitu, bentuk fondasi perkerasan jalan yang diubah menjadi bentuk *honeycomb* yang ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Tampak 3D Cakar Ayam *Honeycomb*



Tampak Atas Cakar Ayam *Honeycomb*

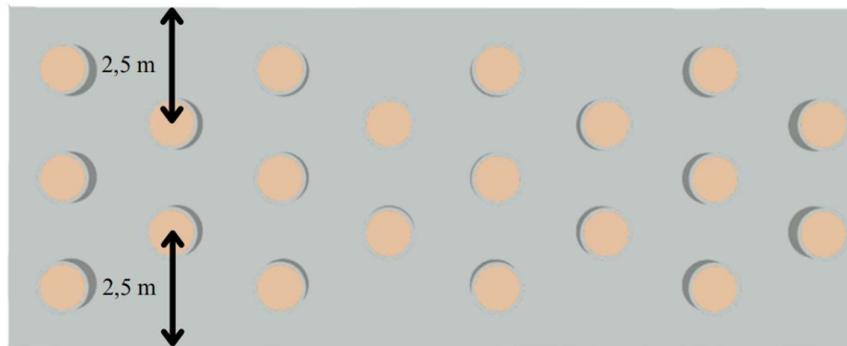


Potongan B - B

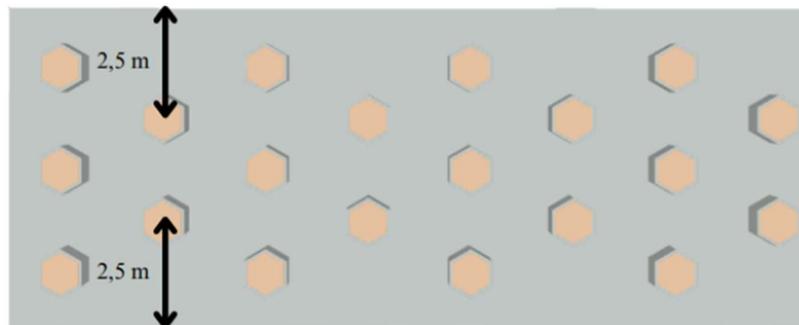
Gambar 3.5 Tipikal sistem perkerasan cakar ayam *honeycomb* yang akan dimodelkan

- Konfigurasi Fondasi Cakar Ayam

Selain mengubah bentuk fondasi menjadi *honeycomb*, maka penelitian ini juga memvariasikan konfigurasi dari fondasi cakar ayam yang akan dimodelkan yaitu konfigurasi sejajar seperti fondasi cakar ayam Sedyatmo dan konfigurasi berpola *zigzag*. Konfigurasi pada penelitian ini bertujuan untuk mencari cara yang paling efisien untuk fondasi cakar ayam guna mengoptimalkan *displacement* pada tanah lunak. Ilustrasi rencana dari konfigurasi berpola sejajar maupun *zigzag* dari fondasi cakar ayam Sedyatmo maupun fondasi cakar ayam *honeycomb* akan ditunjukkan pada Gambar 3.5 dan 3.6 berikut.



Gambar 3.6 Konfigurasi pola *zigzag* cakar ayam Sedyatmo

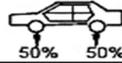
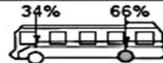
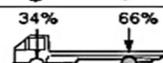
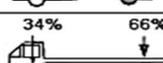
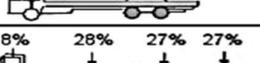


Gambar 3.7 Konfigurasi pola *zigzag* cakar ayam *honeycomb*

3.6 Pembebanan

Aturan referensi pembebanan yang digunakan mengacu pada (Bina Marga, 1993). Pembebanan yang diterapkan merupakan beban muatan sumbu tunggal dengan mengacu truk trailer muatan terberat yaitu truk trailer

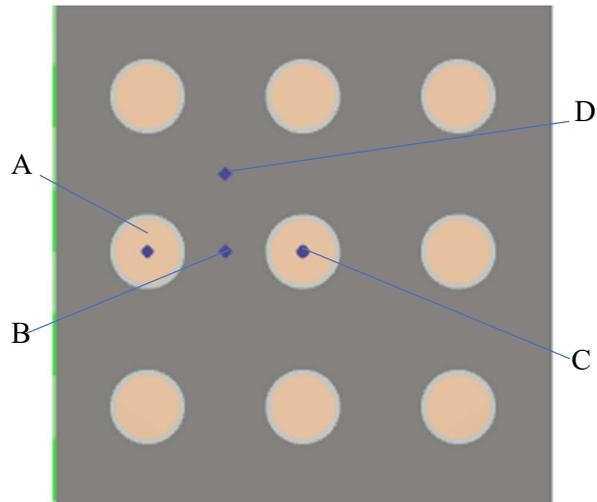
konfigurasi 1,2 – 2,2 dengan berat total maksimum 42 ton, dengan penyebaran terbesar sebesar 54% sehingga dipakailah 54% dari muatan maksimum yaitu sebesar 22,68 ton.

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	
1,2Z 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 Berat (max beam No. 04/MN/BA/83))

Gambar 3.8 Aturan pembebanan (Bina Marga, 1993)

Beban Tunggal 22,68 ton kemudian diletakkan pada empat kondisi pembebanan untuk seluruh sampel. Detail posisi pembebanan dapat dilihat pada Gambar 3.8. Posisi A tepat berada di pusat fondasi cakar ayam di bagian tepi. Posisi B dianggap mewakili posisi tengah as pada jarak x atau y nya. Posisi C tepat berada di pusat fondasi cakar ayam di bagian tengah, Posisi D tepat berada di tengah antara as. Pola pembebanan ini berlaku juga untuk cakar ayam dengan konfigurasi *zigzag*.



3.7 Penyajian Hasil

Setelah mendapat hasil dari pemodelan selanjutnya dilakukan pengolahan data yaitu dengan menyajikan berikut:

- a. Lendutan yang terjadi pada perkerasan kaku fondasi cakar ayam Sedyatmo dan cakar ayam bentuk *honeycomb*
- b. Perbandingan lendutan perkerasan kaku fondasi cakar ayam Sedyatmo dan cakar ayam bentuk *honeycomb*
- c. Perbandingan lendutan untuk perletakan fondasi yang berbeda yaitu bentuk sejajar dan *zigzag*

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Cakar ayam Sedyatmo dapat mereduksi lendutan lebih besar daripada cakar ayam *honeycomb* karena cakar pada cakar ayam Sedyatmo mempunyai volume yang lebih besar jika dibandingkan dengan volume cakar pada cakar ayam *honeycomb* sehingga cakar ayam sediyatmo dapat lebih mereduksi lendutan daripada cakar ayam *honeycomb*.
2. Lendutan yang terjadi pada cakar ayam Sedyatmo dan *honeycomb* tidak jauh berbeda secara signifikan dengan selisih lendutan terbesar 0,24 mm dan persentase lendutan 7,7% pada konfigurasi serta letak beban yang sama.
3. Cakar ayam *honeycomb* dapat diaplikasikan pada konstruksi perkerasan kaku karena perilakunya yang hampir sama dengan cakar ayam Sedyatmo.
4. Pada kasus cakar ayam dengan konfigurasi *zigzag*, jika beban diterapkan di antara cakar, baik pada cakar ayam Sedyatmo maupun *honeycomb* maka lendutannya sangat mirip bahkan sama.
5. Dari hasil variasi tata letak yang telah diteliti, cakar ayam dengan konfigurasi *zigzag* dapat diaplikasikan ke perkerasan kaku di lapangan.
6. Sistem fondasi cakar ayam dengan variasi *zigzag* lebih efisien karena dapat menghemat penggunaan material fondasi cakar ayam

5.2 Saran

Dari kesimpulan yang diambil di atas, peneliti menyarankan beberapa hal yaitu :

1. Jurusan seharusnya mempunyai lisensi *software* di bidang teknik sipil agar memudahkan mahasiswa untuk melakukan penelitian berbasis *software*
2. Untuk penelitian analisis fondasi cakar ayam selanjutnya sebaiknya menggunakan metode pembebanan yang berbeda
3. Untuk penelitian analisis fondasi cakar ayam selanjutnya sebaiknya menggunakan material tanah yang berbeda

DAFTAR PUSTAKA

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) M 145-91. 2004. Classification of Soil and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes
- Bentley. 2022. Plaxis Connect Edition V22.01 Reference Manual.
- Bentley. 2022. Plaxis Connect Edition V22.01 Scientific Manual.
- Bina Marga. 1993. Manual Perkerasan Jalan dengan Alat Benkelman Beam No. 01/MN/BM/83. Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Bina Marga. Jakarta.
- Bowles, J.E. 1989. Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah. Erlangga. Jakarta.
- Das, Braja M. 1998. Mekanika Tanah Jilid 1, Erlangga, Jakarta.
- Das, Braja M. 1998. Mekanika Tanah Jilid 2, Erlangga, Jakarta.
- Departemen Pekerjaan Umum. 2001. Panduan Geoteknik 1, Jakarta
- DEPKIMPRASWIL, 2003. Perencanaan Perkerasan Jalan Beton Semen Pd. T-14-2003, Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, Jakarta.
- Dewi, D.A., 2009, Kajian Pengaruh Tiang Tunggal Terhadap Nilai Koefisien Reaksi Subgrade Ekuivalen pada Uji Beban Skala Penuh, Tesis, Program Studi Teknik Sipil, Program Pascasarjana UGM, Yogyakarta.
- Firdiansyah, A., 2009, Evaluasi Dimensi Sistem Cakar Ayam Akibat Pengaruh Variasi Beban dan Kondisi Tanah, Tesis, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta
- Hales, T. C. (2001). The *honeycomb* conjecture. Discrete & computational geometry, 25, 1-22.
- Hardiyatmo, H.C. 2006. Mekanika Tanah I. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Hardiyatmo, H.C., 2008, *Sistem "Pelat Terpaku" (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., pp. M-1—M-7.

- Hardiyatmo, H.C., 2009, *Metoda Hitungan Pelat dengan Menggunakan Modulus Reaksi Tanah Dasar Ekuivalen untuk Struktur Pelat Fleksibel*, Dinamika Teknik.
- Hardiyatmo, H.C., 2010, *Perancangan Sistem Cakar Ayam Modifikasi untuk Perkerasan Jalan Raya*, Gajah Mada University Press, Yogyakarta.
- Hardiyatmo, H.C., 2011, *Method to Analyze the Deflection of the Nailed-slab System*, International Journal of Civil and Environmental Engineering IJJCE-IJENS, Vol. 11 No. 4, pp. 22-28.
- Hardiyatmo, H. C., 2011, *Perancangan Perkerasan Jalan dan Penyelidikan Tanah*, Yogyakarta: Gajah Mada University Press
- Mochtar, Indrasurya. 2000. *Teknologi Perbaikan Tanah dan Alternatif Perencanaan pada Tanah Bermasalah (Problematic Soils)*.
- Muhu, H.L.Y. (2007). *Kajian Lendutan Pada Sistem Cakar Ayam Akibat Variasi Lebar Pelat (Model Sistem Cakar Ayam dari Pelat Baja)*. Tugas Akhir, Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan, UGM, Yogyakarta, Indonesia.
- Nasibu, R., 2009, *Kajian Modulus Reaksi Tanah Dasar Akibat Pengaruh Tiang (Uji Beban pada Skala Penuh*, Tesis, Program Studi Teknik Sipil, Program Pascasarjana UGM, Yogyakarta, Indonesia.
- Nugroho, S. A., (2011), “*Studi Daya Dukung Fondasi Dangkal pada Tanah Gambut dengan Kombinasi Geotekstil dan Grid Bambu*”, Jurnal Teknik Sipil, Vol. 18 (1) pp. 31-40.
- Pemeliharaan Rutin Jalan Bina Marga. 1999. Departemen Pekerjaan Umum, Jakarta.
- Potts, D. M., dan Zdravkovic, L. 1999. *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering*. Thomas Telford Publishing. Australia.
- Puri, A., Hardiyatmo, C. H., Suhendro, B., dan Rifa'i, A., 2011a, *Studi Eksperimental Lendutan Pelat yang Diperkuat Tiang-tiang Friksi Pendek pada Lempung Lunak*, Prosiding PIT XIV HATTI, Yogyakarta.
- Puri, A., Hardiyatmo, H.C., Suhendro, B., and Rifa'i, A., 2012b, *Application of The Additional Modulus of Subgrade Reaction to Predict The Deflection of Nailed-slab System Resting on Soft Clay Due to Repetitive Loadings*, Proc. of 16th Annual Scientific Meeting (PIT) HATTI, Jakarta, pp. 217-222.

- Puri, A., Hardiyatmo, H.C., Suhendro, B., and Rifa'i, A., 2013a, *Pile Spacing and Length Effects Due To the Additional Modulus of Subgrade Reaction of the Nailed-Slab System on the Soft Clay*, Proc. of 13th International Symposium on Quality in Research (QiR), Yogyakarta, 25-28 June 2013, pp. 1032-1310.
- Puri, A., Hardiyatmo, H.C., Suhendro, B., and Rifa'i, A., 2013b, *Deflection Analysis of Nailed-slab System which Reinforced by Vertical Wall Barrier under Repetitive Loading*, Proc. the 6th Civil Engineering Conference in Asian Region (CECAR6), Jakarta, 20-22 August 2013, pp. TS6-10—TS6-11.
- Badan Standarisasi Nasional. 2016. Standar Pembebanan Jembatan. SNI 1725-2016. Jakarta
- Suhendro, B. (2000). Metode elemen hingga dan aplikasinya. Yogyakarta: Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
- Suhendro, B., 2006, Sistem Cakar Ayam Modifikasi sebagai Alternatif Solusi Konstruksi Jalan di Atas Tanah Lunak, Saduran dari Buku 60 Tahun Republik Indonesia, Jakarta.
- Suhendro, B., dan Hardiyatmo, H.C., 2010, *Sistem Perkerasan Cakar Ayam Modifikasi (CAM) sebagai Alternatif Solusi Konstruksi Jalan di Atas Tanah Lunak, Ekspansif, dan Timbunan*, Prosiding Seminar dan Pameran Sehari 2010 Inovasi Baru Teknologi Jalan dan Jembatan, DPD HPJI Jatim, Surabaya.
- Totomihardjo, S. 2004. Bahan dan Struktur Jalan. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.