

LAPORAN AKHIR PENELITIAN



**JUDUL:
STUDI PARAMETRIK PERKERASAN SISTEM PELAT
TERPAKU PADA TANAH LUNAK**

**Peneliti:
Dr. Anas Puri, S.T., M.T.
NIDN. 1005057003**

**LEMBAGA PENELITIAN
UNIVERSITAS ISLAM RIAU
PEKANBARU
2015**

HALAMAN PENGESAHAN

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

- | | |
|----------------------------|--|
| 1. Judul Penelitian | : STUDI PARAMETRIKPERKERASAN
SISTEM PELAT TERPAKU PADA TANAH
LUNAK |
| 2. Nomor Kontrak | : 031/KONTRAK/LP-UIR/04-2012 |
| 3. Bidang Penelitian | : REKAYASA TEKNIK SIPIL |
| 4. Ketua Peneliti | |
| a. Nama Lengkap | : Dr. ANAS PURI, S.T., M.T. |
| b. Jenis Kelamin | : Laki-laki |
| c. NIK./NIDN | : 96 09 02 239/ 1005057003 |
| d. Jabatan Fungsional | : Lektor Kepala |
| e. Fakultas/ Jurusan | : Teknik/ Teknik Sipil |
| f. Telepon | : 085329582788 |
| g. E-mail | : anaspuri@yahoo.com
anaspuri@eng.uir.ac.id |
| 5. Jangka Waktu Penelitian | : 8 Bulan |

Pekanbaru, 9 Maret 2015

Mengetahui:
Dekan Fakultas Teknik UIR.,

Ketua Peneliti,


Ir. H. ABD. KUDUS, M.T.
NIK. 88 03 02 098


Dr. ANAS PURI, S.T., M.T.
NIK. 96 09 02 239

Menyetujui:
Ketua Lembaga Penelitian UIR.,

H. M. HASBI ZAIDI, S.E., M.P.
NIK. 90 04 02 162

LAPORAN AKHIR PENELITIAN



JUDUL:
**STUDI PARAMETRIK PERKERASAN SISTEM PELAT
TERPAKU PADA TANAH LUNAK**

Peneliti:
Dr. Anas Puri, S.T., M.T.
NIDN. 1005057003

**LEMBAGA PENELITIAN
UNIVERSITAS ISLAM RIAU
PEKANBARU
2015**

HALAMAN PENGESAHAN



- | | |
|----------------------------|--|
| 1. Judul Penelitian | : STUDI PARAMETRIKPERKERASAN
SISTEM PELAT TERPAKU PADA TANAH
LUNAK |
| 2. Nomor Kontrak | : 031/KONTRAK/LP-UIR/04-2012 |
| 3. Bidang Penelitian | : REKAYASA TEKNIK SIPIL |
| 4. Ketua Peneliti | |
| a. Nama Lengkap | : Dr. ANAS PURI, S.T., M.T. |
| b. Jenis Kelamin | : Laki-laki |
| c. NIK./NIDN | : 96 09 02 239/ 1005057003 |
| d. Jabatan Fungsional | : Lektor Kepala |
| e. Fakultas/ Jurusan | : Teknik/ Teknik Sipil |
| f. Telepon | : 085329582788 |
| g. E-mail | : anaspuri@yahoo.com
anaspuri@eng.uir.ac.id |
| 5. Jangka Waktu Penelitian | : 8 Bulan |

Pekanbaru, 9 Maret 2015

Mengetahui:

Dekan Fakultas Teknik UIR.,

Ketua Peneliti,

Ir. H. ABD. KUDUS, M.T.

NIK. 88 03 02 098

Dr. ANAS PURI, S.T., M.T.

NIK. 96 09 02 239

Menyetujui:
Ketua Lembaga Penelitian UIR.,

H. M. HASBI ZAIDI, S.E., M.P.

NIK. 90 04 02 162

IDENTITAS PENELITIAN

1. Judul : Studi Parametrik Perkerasan Sistem Pelat
Terpaku pada Tanah Lunak.

2. Ketua Peneliti

- a) Nama lengkap : Dr. Anas Puri, S.T., M.T.
- b) Bidang Keahlian : Geoteknik
- c) Jabatan Fungsional : Lektor Kepala
- d) Unit kerja : Jurusan Teknik Sipil.
- e) Telp/Fax : +62 85329582788
- f) E-mail : anaspuri@eng.uir.ac.id dan
anaspuri@yahoo.com.

3. Obyek Penelitian :

Perkerasan Sistem Pelat Terpaku yang ditempatkan di atas tanah lunak, dimana perilakunya dianalisis berdasarkan parameter tanah dan luas bidang kontak tanah-struktur pada sistem Cakar Ayam Modifikasi (CAM).

4. Masa pelaksanaan penelitian :

- Mulai : Maret 2012
- Berakhir : Oktober 2012.

6. Bantuan Panalitian dari LP UIR:

- Anggaran tahun 2012 : Rp 4.000.000,00 (Empat juta rupiah).

7. Lokasi Penelitian :

Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan Universitas Gadjah Mada.

8. Hasil yang ditargetkan :

Potensi aplikasi Sistem Pelat Terpaku sebagai teknologi perkerasan kaku pada tanah lunak.

9. Keterangan Tambahan :

Penelitian ini adalah sebagai upaya pengembangan Sistem Pelat Terpaku dan merupakan bagian yang penting dalam mempelajari perilaku Sistem Pelat Terpaku pada tanah lunak di Indonesia.

KATA PENGANTAR



Segala puji bagi Allah Yang Maha Penentu (*al-Mudabbir*), atas rahmat dan kehendak-Nya, dan dengan rizki serta nikmat '*akal* yang telah diberikan-Nya, *alhamdulillah* laporan penelitian ini dapat diselesaikan. Laporan ini menyajikan perilaku Sistem Pelat Terpaku melalui studi parametrik dengan menggunakan data material dari pengamatan Perilaku Sistem Cakar Ayam pada uji skala penuh. selanjutnya diperoleh perbandingan perilaku dari kedua sistem tersebut. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi khususnya teknologi perkerasan jalan pada tanah lunak.

Pada kesempatan ini penulis mengutarakan terima kasih kepada Rektor Universitas Islam Riau (UIR) Pekanbaru beserta Ketua Lembaga Penelitian UIR yang telah memberikan bantuan dana pelaksanaan penelitian ini. Terima kasih diutarakan pula kepada Dekan Fakultas Teknik UIR dan Prof. Ir. Iman Satyarno, M.E., Ph.D. atas segala diskusi dan arahan dalam penyelesaian penelitian ini, mengingat materi penelitian ini merupakan bagian tugas kuliah Pavement Engineering Technology pada Program Doktor Teknik Sipil UGM. Penulis juga mengutarakan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu penelitian ini. Semoga Allah SWT membalas mereka dengan kebaikan. Demikianlah, semoga bermanfaat hendaknya, amin.

Pekanbaru, Oktober 2014.

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	i
IDENTITAS PENELITIAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	iv
I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Tujuan	2
C. Batasan Penelitian	2
D. Faedah	2
II. TINJAUAN PUSTAKA	3
A. Umum	3
B. Metode-motode Konstruksi Perkerasan Kaku pada Tanah Lunak	3
B.1 Timbunan diperkuat geosintetik	3
B.2 Timbunan di atas tiang-tiang	4
B.3 Fondasi konstruksi sarang laba-laba	7
B.4 Sistem Cakar Ayam	8
C. Pengembangan Sistem Pelat Terpaku	11
III. LANDASAN TEORI	14
A. Tipe-tipe Perkerasan Kaku	14
B. Kinerja Perkerasan Kaku	15
C. Lapisan di Bawah Perkerasan Kaku	17
C.1 Tanah dasar	17
C.2 Lapis fondasi bawah	19
D. Metode Elemen Hingga	21
D.1 Fungsi interpolasi dan integrasi numerik luasan elemen	21
D.2 Elemen struktur	23
D.3 Fungsi integrasi dan integrasi numerik elemen volume	25

D.4 Model konstitutif tanah	28
IV. METODE PENELITIAN	34
A. Data dan Tahapan Analisis	34
B. Dimensi dan Konfigurasi Tiang Sistem Pelat Terpaku	35
C. Metode Analisis	37
V. PERBANDINGAN PERKERASAN SISTEM CAM DAN PELAT TERPAKU	40
A. Hasil Pengamatan Lendutan Sistem Cakar Ayam Modifikasi	40
B. Sistem Pelat Terpaku	41
C. Perbandingan Sistem Cakar Ayam Modifikasi dan Sistem Pelat Terpaku	42
C.1 Beban sentris	42
C.2 Beban di pinggir	46
C.3 Pengaruh panjang dan jarak tiang pada Sistem Pelat Terpaku	46
V. KESIMPULAN	49
REFERENSI	51
CURRICULUM VITAE	54
LAMPIRAN	56

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Umumnya perkerasan kaku (*rigid pavement*) digunakan untuk perkerasan jalan pada tanah dasar lunak. Lapis perkerasan tersebut dapat langsung menumpu pada tanah dasar lunak dan/ atau di atas lapis fondasi jalan. Namun penurunan tanah lunak di bawahnya cenderung bersifat tidak seragam (*differential settlement*) sebagai akibat distribusi beban yang tidaklah merata sepanjang perkerasan, atau disertai dengan penurunan tidak seragam akibat ketidak-homogenan tanah. Perkerasan jalan tidak hanya menerima beban siklik oleh kendaraan, namun juga menerima beban akibat temperatur yang membuat perkerasan mengalami momen lentur bolak-balik. Bergelombangnya jalan dan/ atau patahnya struktur perkerasan dapat disebabkan oleh hal-hal tersebut.

Perkerasan jalan pada tanah lunak memerlukan tebal perkerasan yang lebih besar sehingga beban struktur juga bertambah. Adapun metode-metode konstruksi yang telah dikembangkan untuk mengatasi atau meminimalisir masalah tersebut antara lain penggunaan perbaikan tanah, timbunan di atas tiang-tiang (*embankment on piles*), konstruksi sarang laba-laba, serta fondasi cakar ayam.

Aplikasi fondasi cakar ayam menunjukkan keberhasilan yang sangat memuaskan pada konstruksi landas pacu (*run way*), *taxi way*, dan apron pada lapangan terbang dan telah memberikan layanan hingga 29 tahun. Fondasi cakar ayam juga menunjukkan kinerja yang baik pada konstruksi jalan raya, seperti pada Jalan Tol Prof. Sedyatmo menuju Bandara Internasional Soekarno-Hatta di Cengkareng Banten, jalan tol di Malaysia dan lain-lain. Fondasi cakar ayam tersebut, mengalami berbagai pengembangan yang salah satunya adalah penggantian cakar yang semula berbahan beton dengan cangkang baja galvanis sehingga berat sendiri konstruksi jauh berkurang, kemudian dikenal dengan sebutan Sistem Cakar Ayam Modifikasi (CAM). Dalam rangka kemudahan dalam pelaksanaan di lapangan, Hardiyatmo (2008) mengusulkan Sistem Pelat Terpaku (*Nailed-slab System*), yang muncul atas ide mengganti cakar ayam dengan tiang-tiang friksi yang pendek berbahan beton bertulang.

Dalam rangka pengembangan Sistem Pelat Terpaku ini, telah dilakukan studi model laboratorium dan studi analitis (Hardiyatmo, 2008, 2009, 2011; Nasibu, 2009; Dewi, 2009; Taa, 2010; Puri, dkk., 2011a, 2011b, 2012a, 2012b, 2013a), serta uji skala penuh Pelat Terpaku oleh Puri, dkk. (2013b, 2013c, 2013d, 2014). Berdasarkan uji model dan skala penuh terlihat bahwa sistem ini menjanjikan untuk aplikasi lapangan. Maka pada penelitian ini akan dikaji perilaku sistem ini melalui studi parametrik menggunakan hasil uji lapangan Sistem Cakar Ayam Modifikasi (CAM).

A. Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan rancangan Sistem Pelat Terpaku yang mempunyai kinerja berupa lendutan yang hampir sama dengan Sistem Cakar Ayam Modifikasi, untuk dimensi pelat dan beban yang sama.

B. Batasan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan batasan berikut

1. *properties* material menggunakan data uji skala penuh Sistem Cakar Ayam Modifikasi (CAM) yang diambil dari sumber kedua yaitu Firdiansyah (2010),
2. analisis dilakukan khusus untuk beban monotonik,
3. dimensi pelat pada Sistem Pelat Terpaku sama dengan dimensi pelat pada CAM, adapun ukuran diameter tiang mengikuti Hardiyatmo (2008) sedangkan panjangnya divariasikan, dimana salah satu variasi ditentukan dengan cara menyamakan luas selimut tiang dengan luas selimut luar silinder cakar CAM.
4. tidak menganalisis faktor ekonomi kedua sistem.

C. Faedah

Faedah yang diharapkan dari penelitian ini adalah dapat memberikan suatu alternatif desain Sistem Pelat Terpaku pada perkerasan kaku jalan di atas tanah lunak yang mempunyai kinerja menyerupai kinerja Sistem Cakar Ayam Modifikasi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Umum

Telah diuraikan sebelumnya bahwa perkerasan kaku umumnya digunakan pada tanah dasar lunak, namun berpotensi mengalami penurunan yang cenderung bersifat tidak seragam (*differential settlement*) pada arah melintang maupun pada arah memanjang trase jalan akibat ketidak-homogenan tanah maupun distribusi beban yang tidak merata. Perbedaan penurunan tersebut dapat mengakibatkan bergelombangnya jalan dan/ atau patahnya struktur perkerasan. Beberapa metode perencanaan perkerasan kaku pada tanah dasar lunak yang mempunyai kuat dukung rendah bahkan sangat rendah akan diuraikan pada paragraf-paragraf berikut.

B. Metode-metode Konstruksi Perkerasan Kaku pada Tanah Lunak

Beberapa metode konstruksi perkerasan kaku yang telah diaplikasikan pada tanah dasar lunak antara lain

1. timbunan diperkuat geosintetik,
2. timbunan di atas tiang-tiang,
3. fondasi konstruksi sarang laba-laba (KSSL),
4. Sistem Cakar Ayam.

Berikut ini akan diuraikan secara singkat kinerja dari metode-metode tersebut.

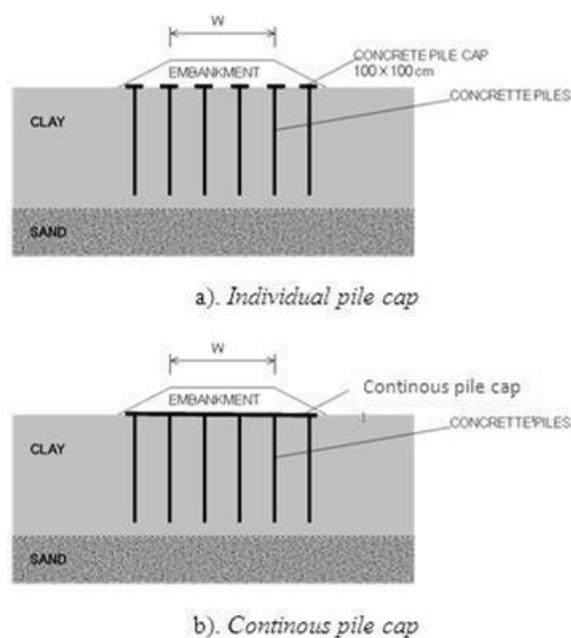
B.1 Timbunan diperkuat geosintetik

Lembaran geosintetik ditempatkan di atas permukaan tanah lunak dan selanjutnya material urugan ditempatkan di atasnya. Lembaran geosintetik ini berfungsi sebagai perkuatan dan separator. Kadangkala, tubuh urugan juga diberikan lembar geosintetik sebagai perkuatan. Lembar geosintetik berfungsi untuk mengurangi *differential settlement* pada puncak timbunan, sehingga diharapkan perkerasan tidak mengalami kerusakan. Oleh karena adanya material urugan, maka tanah lunak di bawahnya akan mengalami penurunan konsolidasi, sehingga tubuh timbunan juga akan mengikutinya dengan pola penurunan di bagian puncaknya menyerupai pola penurunan di dasar timbunan. Pada arah memanjang timbunan/ jalan dapat mengalami penurunan yang tidak seragam yang dapat menyebabkan permukaan

jalan akan bergelombang. Guna mengatasi penurunan konsolidasi dapat dipasang drainase vertikal atau metode lainnya seperti *preloading* dan metode *vacuum*. Bilamana terjadi penurunan kekuatan material timbunan, maka penggunaan perkerasan kaku juga akan berpotensi mengalami kerusakan oleh karena terbentuknya rongga di bawah perkerasan akibat beban berulang. Rongga-rongga di antara pelat dan tanah ini akan mengurangi kontribusi dukungan tanah terhadap pelat sehingga berakibat pecahnya pelat (Hardiyatmo, 2010).

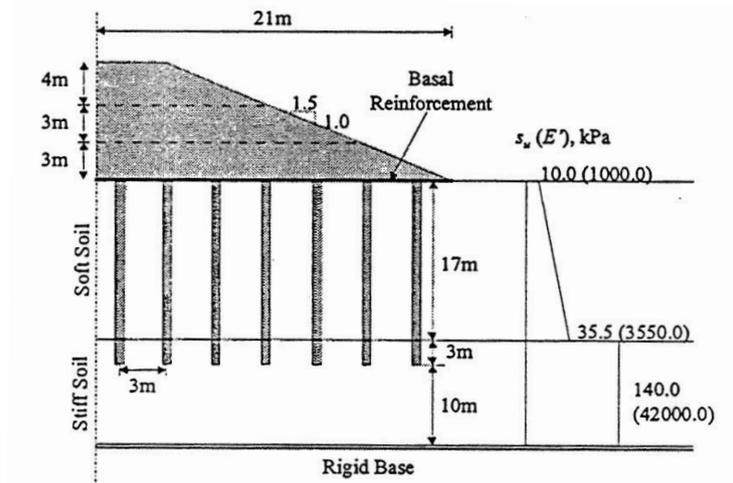
B.2 Timbunan di atas tiang-tiang

Timbunan di atas tiang-tiang dapat berupa *individual pile cap* (Gambar 2.1a) maupun *continuous pile cap* (Gambar 2.1b). Wong dan Poulos (2001) melakukan analisis kinerja berbagai variasi sistem timbunan di atas tiang-tiang (*piled-embankment system*) yang ditempatkan pada tanah lunak setebal 17 m dan menumpu sedalam 3 m pada tanah kaku (Gambar 2.2). Variasi konfigurasi sistem timbunan di atas tiang ditunjukkan pada Tabel 2.1 yang terdiri atas tiga kategori sistem. Gambar 2.3 memperlihatkan hasil analisis dari 3 kategori sistem tersebut. Terlihat bahwa kategori A berupa konstruksi dengan *individual pile cap* mempunyai kinerja terburuk.



Gambar 2.1 Tipikal timbunan di atas tiang-tiang.

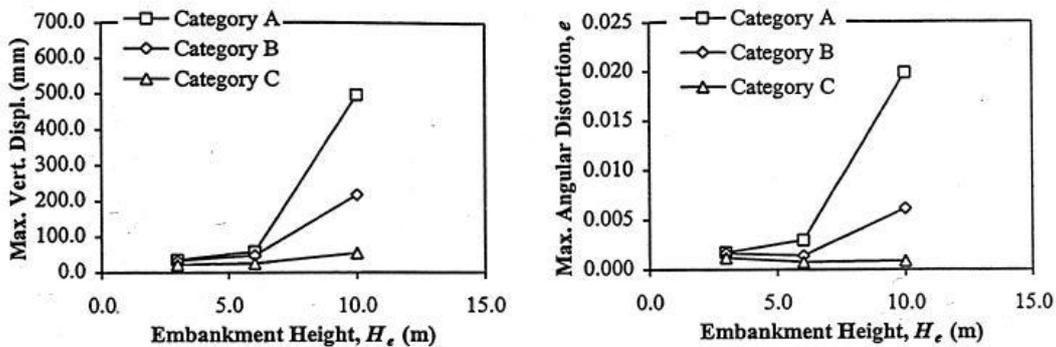
Adapun kategori C, tiang-tiang yang disatukan oleh pelat beton menerus bertulangan sedikit menunjukkan kinerja terbaik. Sistem dapat memberikan perbaikan peningkatan yang sangat baik untuk sistem timbunan di atas tiang-tiang dibandingkan dengan dasar timbunan diperkuat geosintetik ataupun tanpa perkuatan (kategori A dan B).



Gambar 2.2 Sket timbunan pada analisis kinerja berbagai variasi sistem timbunan di atas tiang-tiang (Wong dan Poulos, 2001).

Tabel 2.1. Variasi Konfigurasi Sistem Timbunan di Atas Tiang (Wong dan Poulos, 2001)

Kategori	Detail perkuatan dasar timbunan
A	<i>Individual pile caps</i>
B	<i>Individual pile caps + perkuatan geosintetik</i>
C	<i>Pelat beton menerus (lightly reinforced)</i>



Gambar 2.3 Variasi deformasi pada puncak timbunan terhadap tinggi timbunan. (a) Penurunan maksimum, (b) Distorsi angular maksimum (Wong dan Poulos, 2001).

Gue dan Tan (2005) melakukan pemasangan pelat beton bertulang setebal 30 cm serta ditutup dengan perkerasan lentur di atas timbunan yang terletak di atas tiang-tiang dengan *individual pile cap*, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2.4. Tidak ada informasi bagaimana sambungan pelat dengan tiang dibuat. Metode tersebut dilakukan untuk mengatasi permasalahan penurunan timbunan di atas tiang dengan *individual pile cap* yang mengakibatkan bergelombangnya jalan perkerasan lentur yang dikenal dengan *mushroom problems*. Hal ini diakibatkan oleh penurunan tanah di antara *pile cap* lebih besar dibanding penurunan *pile cap* (Gue dan Tan, 2005), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.4 Perbaikan dengan cara pemasangan pelat beton bertulang. a) Penggalian sedalam 30 cm. b) Setelah penggalian. c) Pemasangan tulangan. d) Pengecoran beton. e) Pengecoran beton telah selesai. f) Perkerasan lentur telah dipasang dan lalu lintas dibuka (Gue dan Tan, 2005).

Penurunan tanah di antara *pile cap* akan terus berlanjut dalam jangka panjang, sehingga permukaan jalan akan semakin bergelombang. Hal ini berakibat pada pemeliharaan jalan menjadi mahal karena perkerasan ulang harus dilakukan secara periodik. Penggunaan pelat menerus di atas tiang-tiang akan mengurangi secara signifikan biaya dan waktu pemeliharaan jalan.



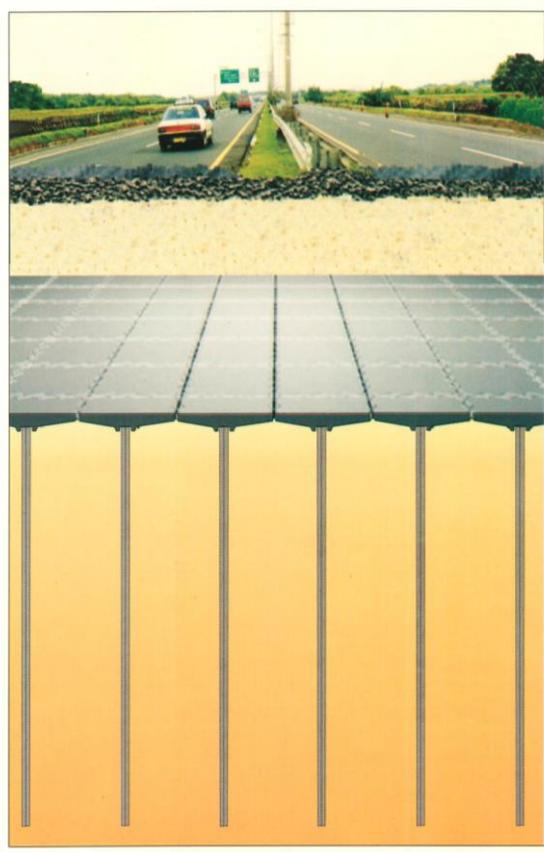
Gambar 2.5 Masalah *mushroom* dan bergelombangnya permukaan jalan (Gue dan Tan, 2005).

Simanjuntak dkk. (2003) meneliti sistem tiang matras beton pada tanah lunak dimana tinjauannya sebagai fondasi konvensional dengan pendekatan *closed to end bearing*. Jadi tiang-tiang didesain sebagai struktur fondasi. Tipikal sistem tiang matras beton ditunjukkan pada Gambar 2.6. Sistem ini juga sudah dilakukan *trial construction* di salah satu bagian Jalan Tol Cengkareng. Sistem tiang matras beton ini terdiri atas tiang-tiang mikro dengan spasi 1,00 m dimana tiap-tiap tiang dilengkapi *pile cap* berukuran 1,00 m \times 1,00 m yang kemudian saling dihubungkan satu sama lainnya menggunakan *concrete seal*. Tiang mikro dan *pile cap*nya berupa beton pracetak. Hubungan tiang dan *pile cap* dengan sistem pen-lubang. Sistem ini diyakini dapat mengatasi problem penurunan yang berlebihan akibat konsolidasi karena dasar tiang mendekati lapisan tanah keras, beserta masalah lainnya pada perkerasan.

B.3 Fondasi konstruksi sarang laba-laba (KSSL)

KSSL ini merupakan salah satu tipe fondasi dangkal berupa fondasi rakit dengan kombinasi antara pelat penuh di permukaannya dan terdapat balok-balok atau

rib-rib pengaku di bawahnya. Sistem ini dapat diaplikasikan sebagai fondasi bangunan gedung ataupun sebagai suatu lapisan permukaan untuk *apron*, *taxiway*, lapangan kontainer, dan perkerasan jalan raya (Wahyudi dkk, 2010). Pada konstruksi jalan raya, sistem ini sebagai perkerasan kaku dimana pelat diperkaku oleh rusuk-rusuk di bawahnya. Rusuk-rusuk tersebut terdiri atas rusuk-rusuk memanjang jalan dan rusuk-rusuk diagonal. Rusuk-rusuk mempunyai ketebalan 10 cm dan rusuk bagian luar mempunyai ketinggian mencapai 90 cm (Wahyudi dkk, 2010). Tipikal fondasi KSSL ditunjukkan pada Gambar 2.7.

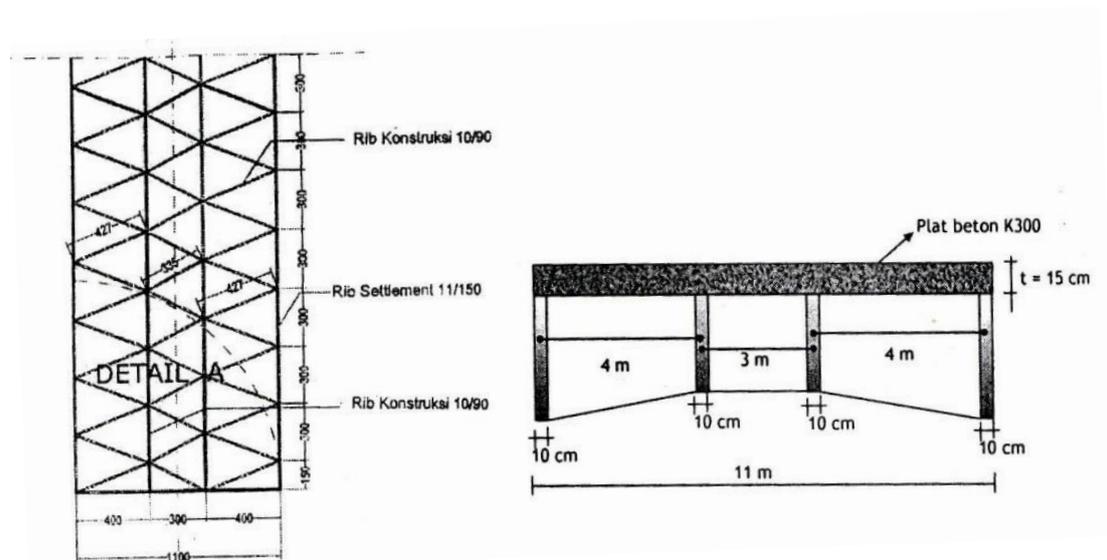


Gambar 2.6 Tipikal fondasi perkerasan jalan sistem tiang matras beton (Simanjuntak, dkk., 2003).

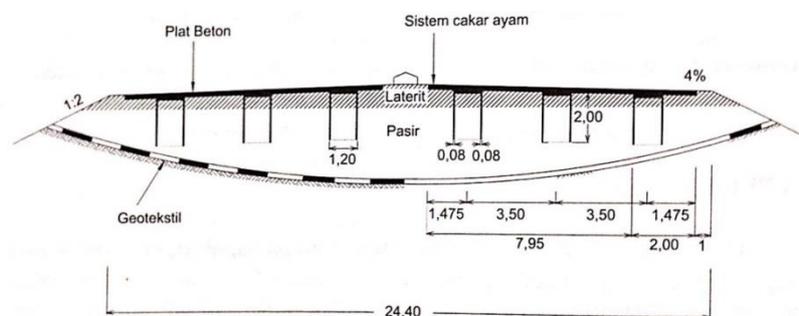
B.4 Sistem Cakar Ayam

Tipikal fondasi cakar ayam pada timbunan badan Jalan Tol Prof. Sedyatmo menuju Bandara Internasional Soekarno-Hatta di Cengkareng Banten ditunjukkan

pada Gambar 2.8. Dasar timbunan diperkuat dengan geosintetik dan fondasi cakar ayam konvensional (terbuat dari pipa beton bertulang) ditempatkan di dalam timbunan, dan selanjutnya pelat beton bertulang berada di atas cakar-cakar tersebut dengan hubungannya dibuat monolit. Fondasi cakar ayam terdiri dari pelat beton bertulang tebal 10 cm -17 cm dan pipa-pipa beton (disebut cakar) berdiameter 120 cm dengan tebal 8 cm dan panjang pipa 150 cm – 200 cm, dengan jarak antar cakar 200 cm – 250 cm (Suhendro dan Hardiyatmo, 2010:1; Hardiyatmo, 2010:1). Sistem cakar ayam yang diaplikasikan pada Jalan Tol Prof. Sedyatmo mengalami penurunan berlebihan akibat konsolidasi tanah dasar, namun permukaan perkerasan tetap rata dan kendaraan masih dapat melewati dengan aman dan nyaman.



Gambar 2.7 Denah dan penampang Fondasi KSSL (Wahyudi dkk, 2010).

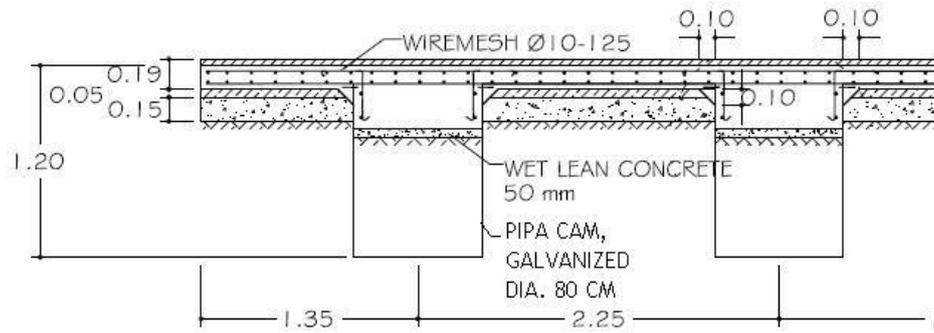


Gambar 2.8 Sistem cakar ayam pada Jalan Prof. Sedyatmo (Hardiyatmo, 2010:6).

Cakar berfungsi sebagai angkur (paku) pelat pada tanah dasar yang dapat menjamin kontak antara tanah dengan pelat sehingga pekerasan lebih awet dan sedikit perawatan. Adapun pada sistem konvensional (tanpa cakar) maka akan mudah terbentuk rongga antara tanah dan pelat yang mengakibatkan kekuatan turun tajam berjalan dengan waktu. Alhasil pekerasan kurang awet (mudah pecah) dan memerlukan biaya perawatan yang tinggi (Hardiyatmo, 2010:9).

Sebagai perkuatan pekerasan kaku pada tanah lunak, sistem cakar ayam dikembangkan dengan mengganti pipa beton bertulang dengan pelat baja (Suhendro dan Hardiyatmo, 2010), selanjutnya dikenal dengan sistem cakar ayam modifikasi (CAM). Gambar 2.9 dan 2.10 memperlihatkan contoh konstruksi CAM. Cakar terbuat dari pelat baja bergalvanis dengan tebal 1,4 mm, diameter 80 cm dan tinggi 120 cm yang dipasang di bawah pelat beton berketebalan 15 cm dengan jarak antar cakar 250 cm. Fondasi cakar ayam modifikasi ini telah diaplikasikan di de Tour Jl. Tol Prof. Sedyatmo Cengkareng, *trial road* Pamanukan-Sumedang KM. 25+800 Jawa Barat dan Jl. Tol Seksi 4 Makassar, serta jalan truk pangangkut semen di Samarinda (Suhendro dan Hardiyatmo, 2010:14-17). Selain itu, penggunaan cakar ayam modifikasi untuk masalah jalan pada tanah ekspansif juga sedang dikembangkan. Sistem cakar ayam cocok untuk menahan gerakan naik-turun pekerasan akibat kembang-susut tanah.

Penggunaan pelat baja yang dibentuk menjadi silinder/ pipa lebih praktis dalam mobilisasinya dimana pelat-pelat baja dibawa ke lokasi pekerjaan dalam bentuk lembaran yang kemudian di lokasi pekerjaan dilakukan penggulungan membentuk pipa sesuai diameter rencana. Adapun sambungan pelat tersebut dapat dengan cara dilas maupun paku keling. Selain itu, tanah dasar tidak mengalami gangguan berarti saat instalasinya. Sistem CAM ini juga tidak memerlukan alat-alat berat saat pelaksanaan, demikian halnya tidak memerlukan pekerasan sementara untuk landas kerja alat berat. Dari sisi berat sendiri konstruksi, CAM memberikan reduksi berat sendiri yang sangat signifikan, dimana cakar ayam konvensional (berbahan beton) mempunyai berat 1,1 ton sedangkan CAM hanya 35 kg (Suhendro dan Hardiyatmo, 2010:5). Dengan demikian kinerja cakar ayam modifikasi ini menjadi lebih baik.



Gambar 2.9 Contoh detail desain fondasi CAM (Dokumentasi Mitrabani, 2007).



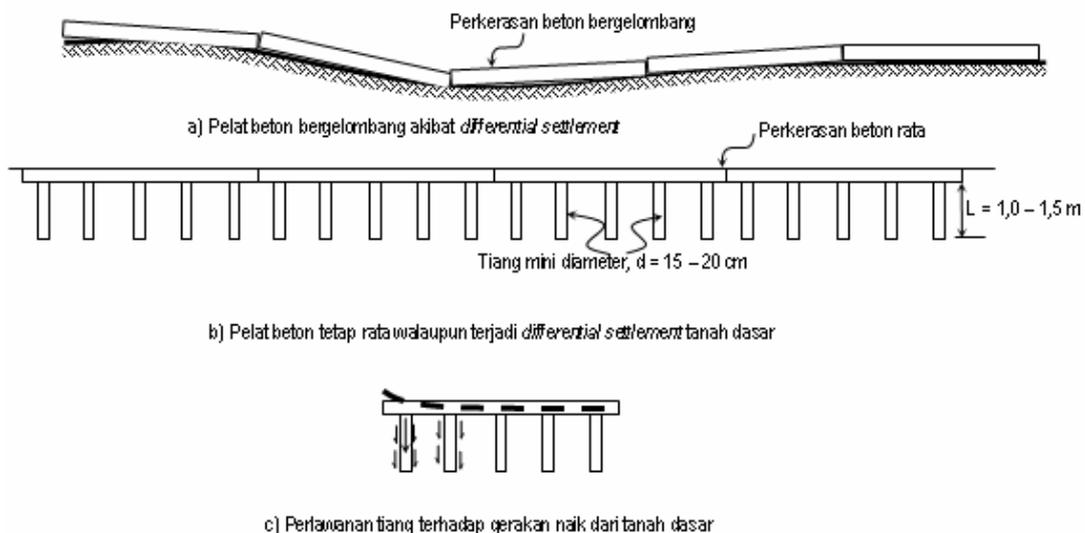
Gambar 2.10 Pelaksanaan perkerasan kaku sistem CAM pada CRCP (Suhendro dan Hardiyatmo, 2010).

C. Pengembangan Sistem Pelat Terpaku

Sistem pelat terpaku (*nailed-slab system*) dipekenalkan oleh Hardiyatmo (2008). Gambar 2.11 mengilustrasikan perbandingan perkerasan kaku konvensional dengan perkerasan sistem pelat terpaku dan perlawanan tiang terhadap beban. Perkerasan kaku diperkuat dengan tiang-tiang pendek. Tiang-tiang tersebut berfungsi laksana paku bagi pelat beton, serta menambah kuat dukung tanah dan mengurangi faktor kehilangan dukungan (*loss support factor, LS*), sehingga meningkatkan

modulus reaksi *subgrade* vertikal efektif. Alhasil, terjadi efisiensi pada pelat beton. Dalam studi itu, Hardiyatmo menggunakan data uji beban siklik pada model fondasi tiang tunggal dengan hubungan antara tiang dengan *pile cap* dibuat monolit dan tidak monolit. Analisis didasarkan pada AASHTO 1986. Hardiyatmo (2009) merekomendasikan metode analisis lendutan pelat fleksibel menggunakan modulus reaksi tanah dasar ekuivalen.

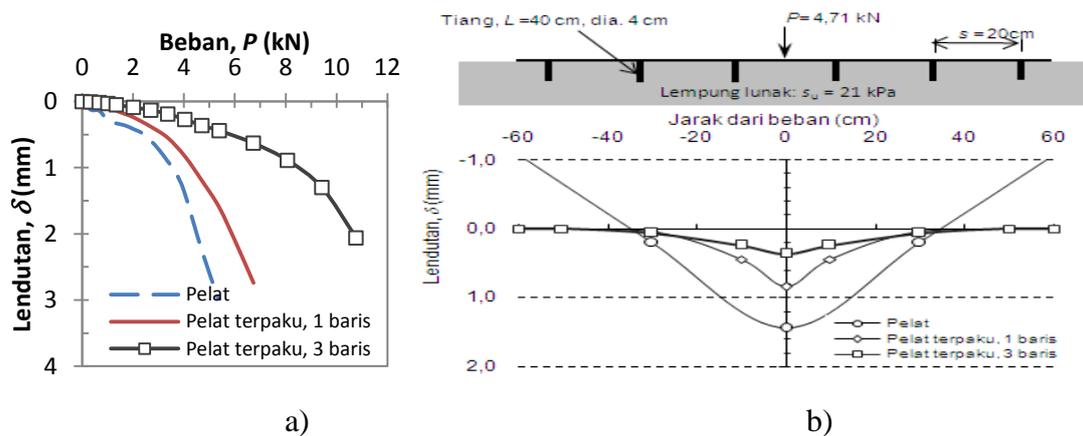
Analogi dengan sistem cakar ayam, maka sistem pelat terpaku ini juga diharapkan berfungsi sebagai angkur pada beban rendah dan sekaligus berfungsi sebagai perlawanan lendutan pada beban berat. Kinerjanya pun diharapkan serupa dengan kinerja sistem cakar ayam, namun dengan konstruksinya yang lebih kecil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



Gambar 2.11 Ilustrasi pengaruh pemasangan tiang sebagai "paku" pada perkerasan beton (Hardiyatmo, 2008).

Berdasarkan hasil uji model Sistem Pelat Terpaku pada lempung lunak sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.12, diketahui bahwa Sistem Pelat Terpaku meningkatkan kekakuan sistem, dan kekakuan tersebut meningkat seiring dengan penambahan jumlah baris tiang, dan lebih kaku dibanding pelat saja (2.12a). Peningkatan kekakuan tersebut sebagai kontribusi dari adanya tiang-tiang. Alhasil,

lendutan pelat terpaku lebih kecil dan terkonsentrasi hanya di sekitar beban, serta tidak ada pelat yang terjungkit karena ditahan oleh tiang-tiang (2.12b). Dalam hal ini tiang berfungsi sebagai penahan lendutan dan juga sebagai jangkar/ angkur untuk menahan jungkitan (Puri dkk, 2011; Puri, 2015). Sistem Pelat Terpaku menunjukkan perilaku bahwa pelat tetap kontak dengan tanah (tidak terdapat *displacement* negatif yang signifikan). Dengan demikian keawetan pelat diharapkan menjadi lebih terjaga.



Gambar 2.12 Pengaruh jumlah baris tiang terhadap lendutan akibat beban sentris (Puri, 2015); a) Hubungan P - δ , b) Distribusi lendutan sepanjang pelat.

III. LANDASAN TEORI

A. Tipe-Tipe Perkerasan Kaku

Pada perkerasan kaku, kondisi fondasi dan tanah dasar mempengaruhi tebal perkerasan dan perlu atau tidaknya penulangan. Kekuatan struktural perkerasan bertambah bilamana digunakan lapis fondasi berupa *cement-treated base*. Selain itu juga membantu transfer beban pada sambungan. Berdasarkan kondisi penulangannya, maka perkerasan kaku umumnya dibagi menjadi tiga tipe (Austroad, 1992:9.1; Dellate, 2008:25), yaitu:

1. perkerasan beton tanpa tulangan (*jointed plain concrete pavement, JPCP*),
2. perkerasan beton bertulang dengan sambungan (*jointed reinforced concrete pavement, JRCP*), dan
3. perkerasan beton bertulangan menerus (*continuously reinforced concrete pavement, CRCP*).

Masing-masing konstruksi yang berbeda tersebut dapat digunakan untuk banyak aplikasi yang berbeda, namun pada dasarnya aplikasi-aplikasi berikut lebih banyak digunakan (Griffiths dan Thom, 2007:18);

- a. JPCP banyak digunakan pada lapangan terbang (*apron, landas pacu, dan taxiway*), perkerasan untuk lalu lintas berat pada daerah tropis,
- b. JRCP banyak diaplikasikan pada fasilitas industri, perkerasan jalan pada area kuat dukung tanah dasar rendah atau tidak menentu,
- c. CRCP digunakan pada perkerasan jalan pada lokasi yang material pembentuk beton banyak tersedia.

Di Indonesia, tipe CRCP sering pula diaplikasikan pada Fondasi Konstruksi Sarang Laba-laba dan Sistem Cakar Ayam.

Beban lalu lintas yang bekerja terutama pada kecepatan tinggi akan menyebabkan pecahnya *interlock* agregat sehingga berakibat pada kerusakan selama umur perkerasan yang tidak dapat dicegah. Untuk itu ruji (*dowel*) diberikan melewati sambungan guna menyalurkan beban. Sambungan diizinkan untuk membuka dan menutup tanpa adanya tahanan dengan penggunaan batang ruji yang licin (umumnya polos atau baja yang dilapisi *epoxy*) dengan cara diberi gomok atau oli pada

permukaannya (Delatte, 2008:27). Bilamana ruji atau batang pengikat (*tie bar*) diabaikan maka akan mengurangi efisiensi sambungan dan menambah tebal perkerasan yang diperlukan (Griffiths dan Thom, 2007:7).

Cara pembangunan perkerasan JPCP juga diterapkan pada perkerasan beton bertulang dengan sambungan (JRCP), dimana sistem sambungan memanjang dan melintang konvensional tetap digunakan namun tulangan ditambahkan di dalam beton. Tulangan beton tersebut berfungsi untuk mengontrol retak dan menahan agar sambungan tetap rapat, akan tetapi juga dapat menambah kekakuan pelatnya (Griffiths dan Thom, 2007:9). Pelat beton bertulang dapat dibangun dengan sistem pelat panjang mencapai 30 m maupun pelat pendek 7,5 – 9 m (Delatte, 2008:27).

Perkerasan beton bertulangan menerus (CRCP) akan lebih murah dibandingkan konstruksi beton aspal yang tebal bilamana material pembentuk beton banyak tersedia (Griffiths dan Thom, 2007:13). Karakteristik CRCP adalah penggunaan tulangan baja ringan dan tidak adanya sambungan. Namun jumlah baja yang dibutuhkan sedikit lebih banyak dibanding perkerasan JPCP, umumnya berkisar 0,4% – 0,8% lebih banyak pada arah memanjang. Tulangan pada arah melintang lebih sedikit karena sebagai tulangan tempertur. Tulangan-tulangan bekerja serentak untuk menahan retak dan menyediakan *interlock* agregat serta penyaluran gaya geser. Pada ujung-ujung perkerasan dibutuhkan angkur guna menjaga bagian ujung terhadap kontraksi akibat penyusutan dan membantu terbentuknya pola retak yang diinginkan (Delatte, 2008:28).

B. Kinerja Perkerasan Kaku

Rekayasa perkerasan beton merupakan pemilihan desain, material, dan pelaksanaan konstruksi guna menjamin kinerja yang memadai selama umur perkerasan (Delatte, 2008:46). Kehalusan dan ketahanan selip yang merupakan kinerja fungsional perkerasan merupakan hal yang sensitif bagi pengguna jalan, dibanding terhadap kinerja strukturalnya. Di sisi lain, perkerasan mengembangkan pelepasan tegangan (*distress*) secara bertahap akibat pengaruh beban lalu lintas dan lingkungan, dimana hal ini merupakan kaidah umum yang berlaku pada perkerasan. Oleh karena itu, ketika pemilihan material jelek dan pelaksanaan yang tidak baik,

maka kerusakan akan terjadi sebelum atau dalam jangka waktu pendek sesudah perkerasan melayani lalu lintas (Delatte, 2008:46).

Tipe-tipe *distress* pada JPCP dan JRCP meliputi (Delatte, 2008:46):

1. Retakan, dibagi ke dalam: pecah sudut (*corner breaks*), retak daya tahan (*durability "D" cracking*), retak memanjang, dan retak melintang.
2. Kerusakan sambungan (*joints deficiencies*), seperti kerusakan penutup sambungan pada arah melintang maupun memanjang, dan disintegrasi beton pinggir perkerasan pada sambungan (*joint spalling*) pada arah melintang maupun memanjang.
3. Rusak permukaan (*surface difects*), terbagi atas retak peta (*map cracking*), *scaling*, agregat licin (*polished aggregates*), dan *popouts*.
4. Serbaneka *distress*, diklasifikasikan sebagai *blowups*, patahan sambungan melintang dan retakan, pinggir turun (*lane-to-shoulder drodoff*), terpisahnya perkerasan dengan bahu jalan (*lane-to-shoulder separation*), melemahnya tambalan (*patch deterioration*), dan *water bleeding* dan *pumping*.

Tipe *distress* pada CRCP meliputi (Delatte, 2008:46):

1. Retakan, sebagaimana uraian di atas, hanya saja tidak terdapat pecah sudut.
2. Rusak permukaan, sebagaimana penjelasan di atas.
3. Serbaneka *distress* seperti disebutkan di atas, dan ditambah dengan *punchouts*, melemahnya sambungan muai arah melintang, dan kerusakan penutup sambungan memanjang. Namun karena CRCP tidak mempunyai sambungan, maka patahan sambungan tidak terjadi.

Retak pelat dapat mengakibatkan hal-hal berikut (Hardiyatmo, 2007:226):

1. Hilangnya kenyamanan berkendara (terjadinya kegagalan fungsional perkerasan).
2. Hilangnya kemampuan penyebaran tegangan ke lapisan di bawah pelat.
3. Hilangnya keindahan permukaan jalan.
4. Korosi pada tulangan.
5. Masuknya air ke lapisan lebih bawah, sehingga dukungan terhadap pelat melemah.

Pengendara jalan sangat memperhatikan kondisi permukaan perkerasan. Namun seiring dengan waktu biasanya kondisi permukaan perkerasan kian memburuk. Tekstur mikro (*microtexture*) dan makro (*macrotexture*) dari perkerasan memberikan kontribusi terhadap karakteristik permukaan perkerasan (Delatte, 2008: 62). Ada tiga hal yang harus diperhatikan terkait dengan karakteristik permukaan perkerasan yaitu kehalusan (*smoothness*), tahanan selip/ gelincir (*skid resistance*) dan kebisingan.

C. Lapisan di Bawah Perkerasan Kaku

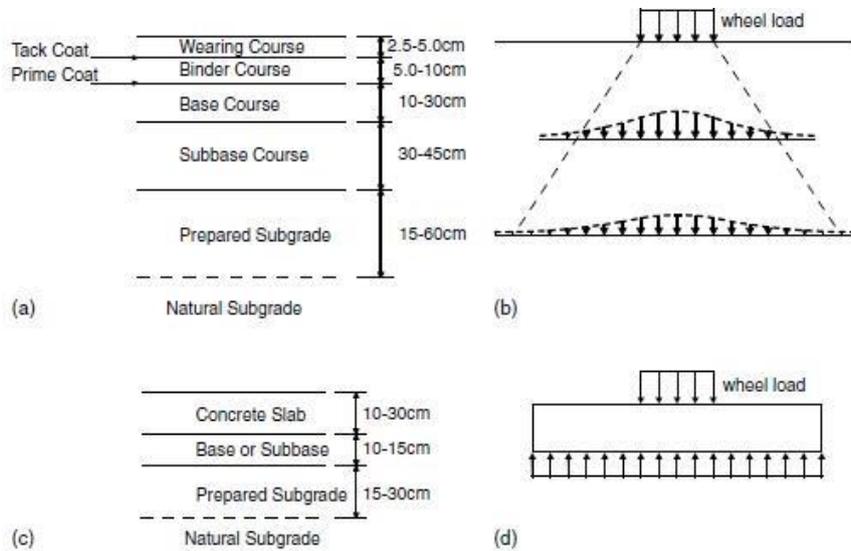
C.1 Tanah dasar

Lapisan di bawah perkerasan sangat mempengaruhi kinerja perkerasan, baik oleh tanah dasar maupun lapis fondasi bawah. Lapisan tanah dasar terutama akan sangat berpengaruh adalah stabilitasnya, kuat dukung, konsolidasi, dan kerentanan terhadap kelembaban. Seringkali satu atau lebih lapisan ditambah di antara tanah dasar dan perkerasan yang juga berfungsi untuk mengurangi intensitas tegangan kerja pada tanah dasar. Pada perkerasan kaku, tekanan yang bekerja pada fondasi bawah dan tanah dasar menjadi lebih kecil disebabkan distribusi tekanan yang lebih lebar dibandingkan dengan perkerasan aspal. Maka kuat dukung lapisan di bawahnya menjadi kurang kritis, sehingga tidak memerlukan material fondasi yang lebih kaku kecuali untuk perkerasan yang menerima beban sangat berat (Delatte, 2008: 69).

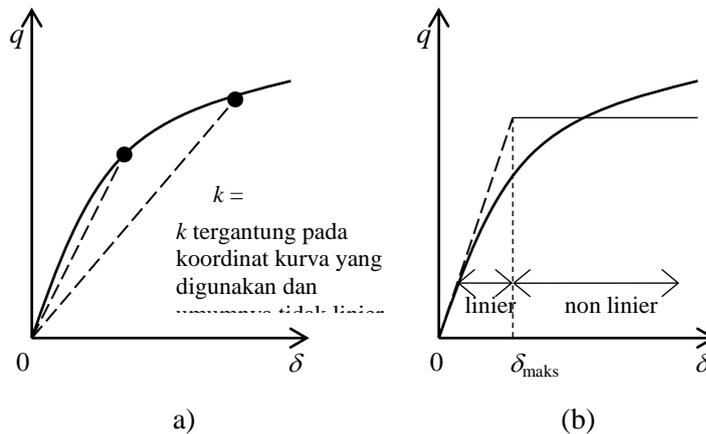
Gambar 3.1 memperlihatkan geometri lapis perkerasan menurut tipe perkerasan beserta diagram distribusi beban. Pada perkerasan lentur, tegangan maksimum terjadi tepat di bawah beban roda dan semakin mengecil seiring semakin jauh dari beban (Gambar 3.1b). Adapun pada perkerasan kaku distribusi beban adalah merata dengan intensitas yang relatif sama (Gambar 3.1d).

Tanah dasar merupakan tanah asli sebagai alas jalan pada suatu lokasi, namun jika diperlukan, material yang lebih baik dapat didatangkan atau tanah dasar dapat pula distabilisasi untuk meningkatkan kuat dukungnya. Parameter penting pada teknik perkerasan beton adalah kualitas dukungan tanah dasar yang disediakan untuk perkerasan yang dikarakterisasi dengan modulus reaksi tanah dasar (*modulus of subgrade reaction*) k . Modulus ini menggambarkan konstanta pegas dari pegas khayalan yang mendukung pelat. Reaksi tanah dasar meningkat secara linier dengan

defleksi pelat (Delatte, 2008: 71). Modulus tersebut dapat ditentukan dari uji pelat beban, atau perkiraan berdasarkan klasifikasi tanah maupun nilai CBR.



Gambar 3.1 Geometri dan karakteristik transmisi beban (a) tipikal penampang perkerasan fleksibel; (b) transmisi beban pada perkerasan fleksibel; (c) tipikal penampang perkerasan kaku; (d) transmisi beban pada perkerasan kaku (Fwa dan Wei, 2006: 9-2).



Gambar 3.2 Cara pengambilan nilai k : (a) Modulus sekan (b) Modulus tangen awal (Bowles, 1997: 501).

Berdasarkan hasil uji pelat beban, nilai k dapat diperoleh dengan membuat grafik hubungan tekanan q terhadap penurunan δ seperti Gambar 3.2. Nilai k dapat diambil dengan salah satu cara berikut (Bowles, 1997: 501)

1. nilai k ditentukan dari nilai tekanan kontak terhadap penurunan tertentu (modulus sekan), sebagaimana Gambar 3.2a,
2. nilai k diambil dari garis singgung yang melalui titik nol (*initial tangent modulus*), sebagaimana Gambar 3.2b.

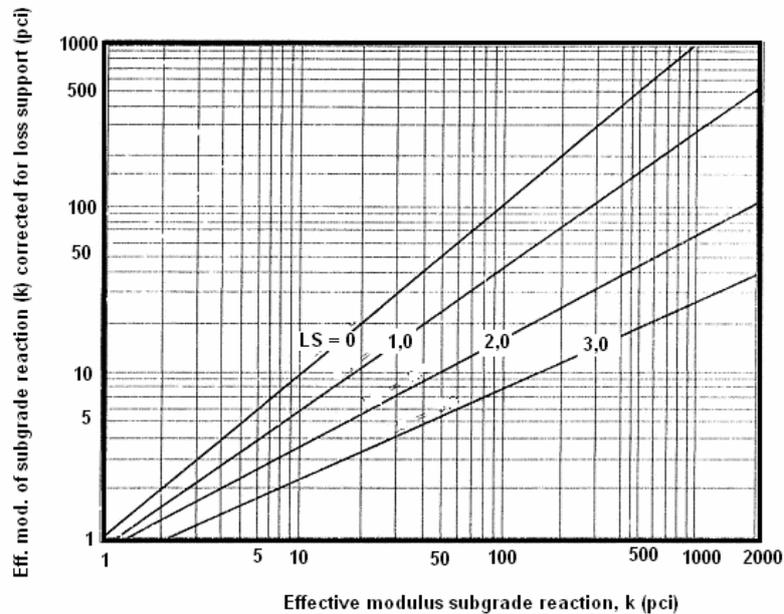
C.2 Lapis fondasi bawah

Penggunaan lapis fondasi di bawah perkerasan kaku didasarkan atas beberapa pertimbangan, yaitu untuk pengendalian terhadap *pumping* (proses keluarnya air dan butiran-butiran halus tanah dasar atau fondasi bawah melalui sambungan dan retakan atau pada bagian pinggir perkerasan sebagai akibat lendutan setelah adanya akumulasi air bebas di bawah pelat), pengendalian terhadap sistem drainase bawah perkerasan, pengendalian terhadap pengaruh kembang-susut tanah dasar, guna percepatan pekerjaan konstruksi, dan menjaga kerataan dasar dari pelat beton (Suryawan, 2009: 1). Lebih jauh, lapis fondasi tersebut dapat memberikan fungsi sebagai berikut

1. menyediakan lapisan yang seragam, stabil dan permanen,
2. meningkatkan modulus reaksi tanah dasar menjadi modulus reaksi komposit,
3. melindungi terhadap gejala *pumping* butiran-butiran halus tanah dasar,
4. mengurangi terjadi retak pelat beton,
5. menyediakan rantai kerja.

Fondasi jalan dapat berupa fondasi atas (*base*) dan fondasi bawah (*sub base*). Untuk perkerasan komposit fleksibel (atau semi kaku) berbeda jelas pada sistem pelat permukaan dimana kekuatan perkerasan ditentukan oleh kombinasi kapasitas struktural lapisan bitumen dan ikatan semen (Griffiths dan Thom, 2007: 21). Sistem ini dibedakan atas tiga kelompok, yaitu sistem *roller compacted concrete* (RCC), sistem fondasi material ikatan semen (*cement bound material*, CBM), dan sistem fondasi bawah CBM kekuatan rendah dengan satu lapisan bitumen tipis yang bekerja sebagai bagian struktur utama dalam sistem perkerasan. Keberadaan lapis fondasi menguntungkan secara struktural dimana terjadi peningkatan kekuatan secara keseluruhan, ditandai dengan peningkatan modulus reaksi tanah dasar efektif, k' . AASHTO (1993: II-42) memberikan grafik penentuan modulus reaksi efektif yang dipengaruhi oleh lapisan di bawah perkerasan kaku seperti Gambar 3.4. Pengaruh

lapisan di bawah perkerasan dinyatakan oleh faktor kehilangan dukungan (*Loss Support Factor*, *LS*) yang besarnya bergantung jenis lapisannya (Tabel 3.1).



Gambar 3.4 Penentuan modulus reaksi *subgrade* efektif terkoreksi, *k* (AASHTO, 1993: II-42).

Tabel 3.1 Faktor Kehilangan Dukungan, *LS* (AASHTO, 1993: II-27)

Tipe Material	<i>LS</i>
<i>Cement treated granular base</i> (E = 1000.000-2.000.000 psi)	0-1
<i>Cement agregate mixtures</i> (E = 500.000-1.000.000 psi)	0-1
<i>Asphalt treated base</i> (E = 350.000-1.000.000 psi)	0-1
<i>Bituminus stabilized mixtures</i> (E = 40.000-300.000 psi)	0-1
<i>Lime stabilized</i> (E = 20.000-70.000 psi)	1-3
<i>Unbound granuler material</i> (E = 15.000-45.000 psi)	1-3
<i>Fine grained/natural subgrade</i> (E = 3.000-40.000 psi)	2-3

Perkerasan kaku yang terletak pada tanah dasar lunak atau perkerasan kaku yang menerima beban lalu lintas yang berat ataupun volume lalu lintas yang tinggi, maka pelat perkerasan dapat diperkuat dengan beberapa tipe fondasi, yaitu

1. fondasi tiang, seperti perkerasan dengan pelat menerus di atas tiang-tiang yang mana pelat dan tiang terhubung secara monolit,

2. fondasi Konstruksi Sarang Laba-laba (KSLL), yang juga menggunakan tipe perkerasan CRCP di atasnya. CRCP dan balok-balok pengaku di bawahnya terhubung secara monolit,
3. fondasi Sistem Cakar Ayam. Sama halnya dengan KSLL, Sistem Cakar Ayam menggunakan tipe perkerasan CRCP di atasnya, dan hubungan pelat dan cakar adalah monolit.

D. Metode Elemen Hingga

D.1 Fungsi interpolasi dan integrasi numerik luasan elemen

Elemen 6-Node Triangular sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.12 mempunyai dua sumbu lokal (ξ dan η) selain itu juga dengan tambahan koordinat bantu $\zeta=1-\xi-\eta$. Elemen ini dibuat pada proses *mesh generation* dalam analisis 2D dan digunakan pada bidang horizontal model 3D untuk membentuk permukaan elemen tanah dengan baji 15 titik nodal. Selain juga sebagai dasar untuk elemen lantai (*floor*) dan beban merata pada bidang kerja model 3D. Elemen 6-node triangular menyediakan interpolasi ordo kedua pada *displacement*. Fungsi bentuk (*shape function*) dapat ditulis sebagai (Plaxis Scientific Manual 3D Foundation v 1.5; 4-4)

$$N_1 = \zeta(2\zeta-1) \quad (3.11)$$

$$N_2 = \xi(2\xi-1)$$

$$N_3 = \eta(2\eta-1)$$

$$N_4 = 4\zeta\xi$$

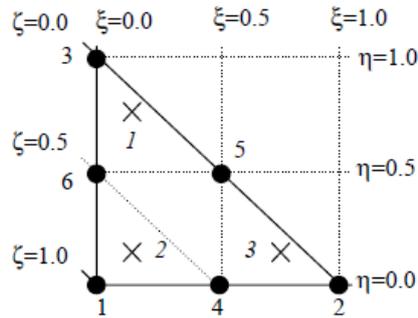
$$N_5 = 4\xi\eta$$

$$N_6 = 4\eta\zeta$$

Formulasi integrasi numerik untuk elemen garis pada suatu luasan adalah

$$\iint F(\xi, \eta) d\xi d\eta \approx \sum F(\xi_i, \eta_i) w_i \quad (3.12)$$

Program Plaxis 3D Foundation menggunakan integrasi Gaussian di dalam elemen luasan. Integrasi tersebut didasarkan pada 3 titik contoh seperti pada Gambar 3.12. Sebagai catatan bahwa jumlah faktor berat (*weight factors*) adalah satu.



Gambar 3.12 Elemen 6-Node triangular; penomoran lokal dan posisi titik nodal (●), titik integrasi (×).

Elemen quadrilateral 8 titik nodal (*8-node quadrilateral element*) dibuat dalam proses perluasan *mesh* 3D dan digunakan pada permukaan elemen baji 15 titik nodal pada arah sumbu *y*. Elemen ini menjadi dasar untuk elemen dinding (*wall*) dan beban merata antara bidang kerja pada model 3D dan untuk elemen bidang kontak (*interface*). Elemen ini juga menyediakan interpolasi *displacement* orde kedua, dan mempunyai koordinat lokal (ξ dan η) seperti pada Gambar 3.13. Fungsi bentuk (*shape function*) dapat ditulis sebagai

$$N_1 = (1-\xi)(1-\eta)(-1-\xi-\eta) / 4 \quad (3.13)$$

$$N_2 = (1+\xi)(1-\eta)(-1+\xi-\eta) / 4$$

$$N_3 = (1+\xi)(1+\eta)(-1+\xi+\eta) / 4$$

$$N_4 = (1-\xi)(1+\eta)(-1-\xi+\eta) / 4$$

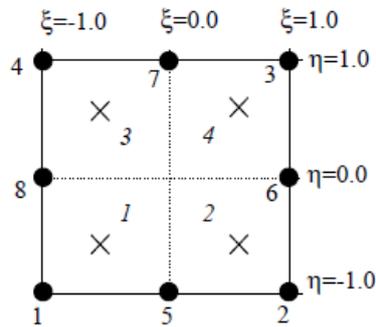
$$N_5 = (1-\xi)(1+\xi)(1-\eta) / 2$$

$$N_6 = (1-\xi)(1+\xi)(1+\eta) / 2$$

$$N_7 = (1-\eta)(1+\eta)(1+\xi) / 2$$

$$N_8 = (1-\eta)(1+\eta)(1-\xi) / 2$$

Integrasi numerik elemen quadrilateral 8 titik nodal didasarkan pada titik Gauss $4 (2 \times 2)$, ekuivalen dengan integrasi elemen garis, namun pada dua arah. Jumlah faktor berat (*weight factors*) adalah sama dengan 4 yang juga sama dengan luasan quadrilateral pada koordinat lokal.



Gambar 3.13 Elemen 8-node quadrilateral; penomoran lokal dan posisi titik nodal (●), titik integrasi (×).

D.2 Elemen struktur

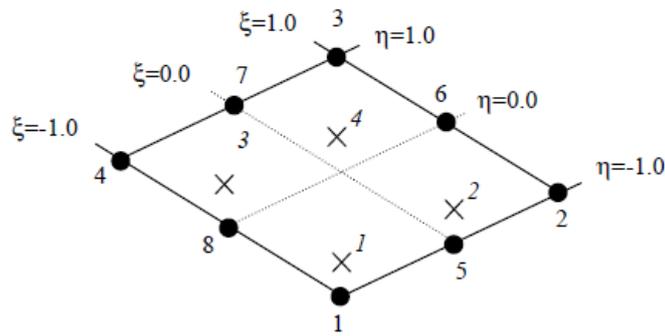
Elemen luasan struktur pada Plaxis 3D Foundation meliputi balok (*beam*), lantai (*floor*), dinding (*wall*) dan bidang kontak (*interface*), yang didasarkan pada elemen garis dan elemen luasan seperti telah dibahas sebelumnya, namun dengan sejumlah perbedaan. Pada bahasan berikutnya hanya diberikan mengenai elemen lantai, dinding dan bidang kontak.

Elemen dinding

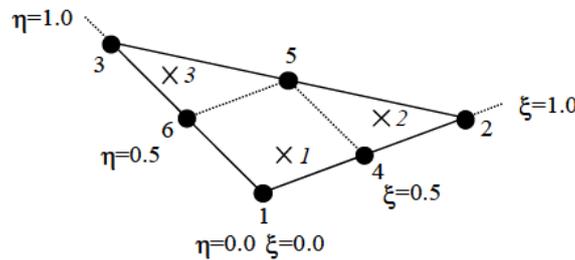
Elemen dinding berbeda sedikit dengan quadrilateral 8 titik nodal dalam pengertian bahwa elemen mempunyai 6 derajat bebas untuk tiap nodal termasuk juga 3 derajat bebas yakni tiga derajat bebas translasi (u_x, u_y, u_z) dan tiga derajat bebas rotasi (ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z). Elemen ini terintegrasi langsung pada seluruh penampangnya dan terintegrasi secara numerik pada seluruh luasannya dengan menggunakan integrasi Gaussian 4 (2×2) titik. Posisi titik integrasi ditunjukkan pada Gambar 3.14.

Elemen lantai

Elemen lantai berbeda dari elemen segitiga 6 nodal dalam hal bahwa keduanya mempunyai enam derajat bebas pada tiap titik nodal termasuk tiga derajat bebas translasi (u_x, u_y, u_z) dan tiga derajat bebas rotasi (ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z). Elemen-elemen ini terintegrasi langsung pada seluruh penampangnya dan terintegrasi secara numerik pada seluruh luasannya dengan menggunakan 3 titik integrasi Gaussian. Posisi titik integrasi ditunjukkan pada Gambar 3.15.



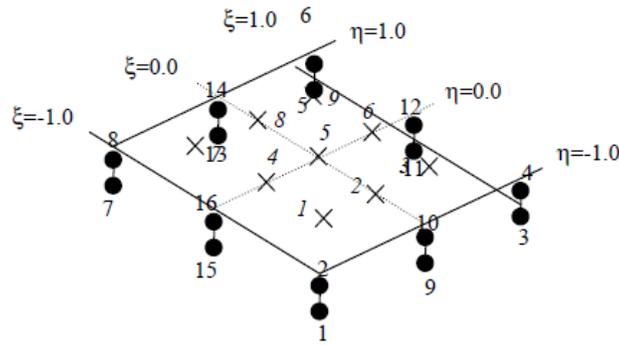
Gambar 3.14 Penomoran lokal dan posisi titik nodal (●) serta titik integrasi (×) pada elemen pelat 8-nodal.



Gambar 3.15 Penomoran lokal dan posisi titik nodal (●) serta titik integrasi (×) pada elemen pelat segitiga 6-nodal.

Elemen bidang kontak (*interface*)

Elemen lantai berbeda dari elemen quadrilateral 8 nodal dalam hal bahwa keduanya mempunyai pasangan nodal dan titik nodal tunggal. Selain itu, elemen bidang kontak mempunyai 3×3 titik integrasi Gaussian termasuk juga 2×2 . Posisi dan penomoran titik nodal dan integrasi diberikan pada Gambar 3.16. Jarak antara dua nodal dari satu pasang nodal adalah nol. Tiap nodal mempunyai tiga derajat bebas translasi (u_x, u_y, u_z). Sebagai hasilnya, elemen bidang kontak memperkenankan perbedaan *displacement* antara pasangan nodal (berupa pergeseran/*slipping* dan renggangan).

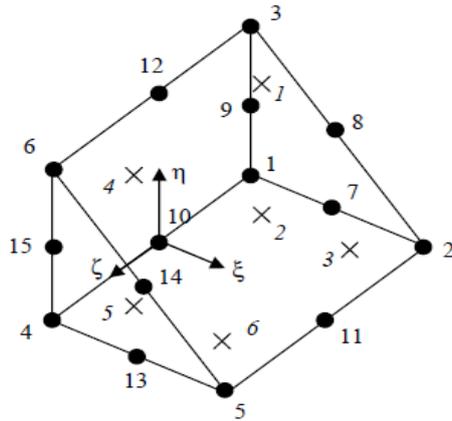


Gambar 3.16 Penomoran lokal dan posisi titik nodal (●) serta titik integrasi (×) pada elemen bidang kontak 16-nodal.

D.3 Fungsi integrasi dan integrasi numerik elemen volume

Pada Plaxis 3D Foundation, volume tanah dimodelkan dengan bantuan elemen baji 15 nodal. Elemen ini dibentuk pada prosedur penambahan *mesh* 3D. Elemen tipe ini menyediakan interpolasi *displacement* orde kedua. Elemen baji mempunyai 3 koordinat lokal (ξ , η dan ζ), dengan fungsi bentuknya sebagaimana Persamaan (3.14) dan penomoran lokal dan posisi titik nodal serta titik integrasi diberikan pada Gambar 3.17.

$$\begin{aligned}
 N_1 &= -(1-\xi-\eta)(1-\zeta)(+2\xi+2\eta+\zeta) / 2 & (3.14) \\
 N_2 &= -\xi(1-\zeta)(2-2\xi-\zeta) / 2 \\
 N_3 &= -\eta(1-\zeta)(2-2\eta+\zeta) / 2 \\
 N_4 &= -(1-\xi-\eta)(1+\zeta)(+2\xi+2\eta-\zeta) / 2 \\
 N_5 &= -\xi(1+\zeta)(2-2\xi+\zeta) / 2 \\
 N_6 &= -\eta(1+\zeta)(2-2\eta-\zeta) / 2 \\
 N_7 &= (1-\xi-\eta)\xi(1-\zeta) * 2 \\
 N_8 &= \xi\eta(1-\zeta) * 2 \\
 N_9 &= \eta(1-\xi-\eta)(1-\zeta) * 2 \\
 N_{10} &= (1-\xi-\eta)(1-\zeta)(1+\zeta) \\
 N_{11} &= \xi(1-\zeta)(1+\zeta) \\
 N_{12} &= \eta(1-\zeta)(1+\zeta) \\
 N_{13} &= (1-\xi-\eta)\xi(1+\zeta) * 2 \\
 N_{14} &= \xi\eta(1+\zeta) * 2 \\
 N_{15} &= \eta(1-\xi-\eta)(1+\zeta) * 2
 \end{aligned}$$



Gambar 3.17 Penomoran lokal dan posisi titik nodal (●) serta titik integrasi (×) pada elemen elemen baji 15-nodal.

Formulasi integrasi numerik pada volume adalah

$$\iiint F(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta \approx \sum_{i=1}^k F(\xi_i, \eta_i, \zeta_i) w_i \quad (3.15)$$

Pada elemen baji 15 nodal digunakan integrasi Gaussian yang didasarkan pada 6 titik sampel. Integrasi merupakan gabungan antara integrasi 3 titik pada elemen triangular 6 nodal dengan integrasi 4 titik pada elemen quadrilateral 8 nodal. Jumlah dari faktor berat adalah 2. Untuk menghitung komponen regangan Cartesian dari *displacement*, derivasi perlu diambil dengan mempertimbangkan sistem sumbu global (x, y, z).

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{B}}_i v_i \quad (3.16)$$

dimana

$$\underline{\underline{B}}_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix}$$

Derivasi di dalam elemen dihitung dengan mempertimbangkan sistem koordinat lokal (ξ , η dan ζ). Hubungan antara derivasi koordinat lokal dan global melibatkan Jacobian J :

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Atau dalam bentuk *invers* sebagaimana diberikan pada Persamaan (3.18).

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Derivasi lokal $\partial N_i/\partial \xi_i$ dan lain-lain dengan mudah diturunkan dari fungsi bentuk elemen, sebab fungsi bentuk diformulasikan pada koordinat lokal. Komponen Jacobian ditentukan dari perbedaan koordinat titik nodal. Komponen regangan Cartesian dapat dihitung dengan penjumlahan kontribusi semua nodal, yaitu

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \sum_i B_i \begin{bmatrix} v_{x,i} \\ v_{y,i} \\ v_{z,i} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Dimana v_i merupakan komponen *displacement* di dalam nodal i .

Matriks kekakuan elemen K_e dihitung menggunakan integral, yaitu

$$\underline{\underline{K}}^e = \int B^T D^e B dV \quad (3.20)$$

Matriks kekakuan elemen tersusun dari submatriks K_{ij} dimana i dan j adalah nodal lokal. Proses perhitungan matriks kekakuan elemen diformulasikan sebagai

$$\underline{\underline{K}}_{ij}^e = \sum_k \underline{\underline{B}}_i^T \underline{\underline{D}}^e \underline{\underline{B}}_j w_k \quad (3.21)$$

D.4 Model konstitutif tanah

Sistem koordinat 3 dimensi dan perjanjian tanda tegangannya diberikan pada Gambar 3.18. Tensor tegangan dapat dinyatakan dengan matriks pada sistem koordinat Cartesian sebagai

$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

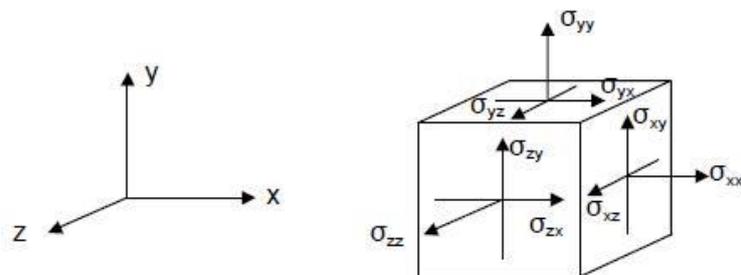
Tensor tegangan tersebut adalah simetris karena memenuhi teori deformasi standar, yaitu $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$, $\sigma_{yz} = \sigma_{zy}$, dan $\sigma_{xz} = \sigma_{zx}$. Maka hanya ada 6 komponen yang berbeda, sehingga dapat ditulis dalam bentuk notasi vektor yaitu

$$\underline{\underline{\sigma}} = (\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \sigma_{zz} \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{zx})^T \quad (3.23)$$

Merujuk pada prinsip Terzaghi bahwa tegangan-tegangan di dalam tanah dibedakan ke dalam tegangan efektif, σ' dan tekanan pori, σ_w , maka

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{\sigma}}' + \underline{\underline{\sigma}}_w \quad (3.24)$$

Tekanan pori disebabkan oleh keberadaan air di dalam pori-pori tanah. Air dianggap tidak mempunyai tegangan geser, sehingga tegangan geser efektif sama dengan tegangan geser total. Air dipertimbangkan sebagai material yang isotropik sempurna, sehingga seluruh komponen tegangannya bernilai sama dan cukup diwakili dengan nilai p_w . Tegangan normal positif mempunyai makna tarik, sedangkan tegangan normal negatif mempunyai arti tekanan.



Gambar 3.18 Sistem koordinat 3 dimensi dan perjanjian tanda tegangannya.

Tegangan efektif prinsipal ditentukan dengan cara berikut

$$\det(\underline{\underline{\sigma}}' - \underline{\underline{\sigma}}' \underline{\underline{I}}) = 0 \quad (3.25)$$

Dimana $\underline{\underline{I}}$ adalah matriks *identity*. Persamaan ini memberikan tiga solusi tegangan efektif prinsipal yaitu $(\sigma_1', \sigma_2', \sigma_3')$ yang di dalam Program Plaxis disusun dalam bentuk *algebraic order*, yaitu

$$\sigma_1' \geq \sigma_2' \geq \sigma_3' \quad (3.26)$$

Selain itu, tegangan prinsipal juga sangat baik ditentukan dengan menggunakan invarian tegangan yang tidak bergantung pada orientasi sistem koordinat.

Adapun tensor regangan dapat dinyatakan dengan sebuah matriks yang menggunakan koordinat Cartesian, yaitu

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Regangan tersebut merupakan turunan dari komponen displacement seperti $\varepsilon_{ij} = \partial u_i / \partial x_j$, dimana i adalah salah satu dari x, y , atau z . Berdasarkan teori deformasi kecil (*small deformation theory*) maka hanya jumlah kelengkapan komponen regangan geser Cartesian ε_{ij} dan ε_{ji} menghasilkan tegangan geser. Jumlah tersebut dinamakan regangan geser, γ . Komponen regangan pada Persamaan (3.27) dapat digantikan dengan komponen regangan geser. Pada kondisi ini maka regangan sering dinyatakan dengan notasi vektor yang hanya melibatkan 6 komponen berbeda, yaitu

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = (\varepsilon_{xx} \ \varepsilon_{yy} \ \varepsilon_{zz} \ \varepsilon_{xy} \ \varepsilon_{yz} \ \varepsilon_{zx})^T \quad (3.28)$$

Dimana

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \gamma_{xy} = \varepsilon_{xy} + \varepsilon_{yx} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x},$$

$$\gamma_{yz} = \varepsilon_{yz} + \varepsilon_{zy} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}, \gamma_{zx} = \varepsilon_{zx} + \varepsilon_{xz} = \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z}$$

Sama halnya dengan tegangan, maka pada regangan juga berlaku ketentuan bahwa regangan normal positif mempunyai makna tarik, sedangkan regangan normal negatif mempunyai arti tekanan.

Analogi dengan invarian tegangan, maka regangan juga dapat ditentukan dengan invarian regangan, yang sering digunakan berupa regangan volumetrik, ε_v (sebagai jumlah seluruh komponen regangan normal

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (3.29)$$

Regangan volumetrik dinyatakan sebagai negatif untuk kompaksi dan positif untuk dilatasi. Adapun untuk model elastoplastis maka regangan dipisah ke dalam komponen elastis dan plastis, yaitu

$$\underline{\varepsilon} = \underline{\varepsilon}^e + \underline{\varepsilon}^p \quad (3.30)$$

Superscript e digunakan untuk menyatakan regangan elastis dan *p* untuk regangan plastis.

Model elastis linier

Umumnya model material tanah dan batuan dinyatakan sebagai hubungan antara peningkatan infinitesimal tegangan efektif (kecepatan tegangan efektif) dan peningkatan infinitesimal regangan efektif (kecepatan regangan efektif), dan dinyatakan dengan

$$\underline{\dot{\sigma}}' = \underline{\underline{M}} \underline{\dot{\varepsilon}} \quad (3.31)$$

Dimana $\underline{\underline{M}}$ = matriks kekakuan material. Pada pendekatan ini, tekanan air pori secara eksplisit dikeluarkan dari hubungan tegangan-regangan. Adapun pada Plaxis didasarkan pada Hukum Hooke untuk perilaku elastis linier isotropik dan disediakan pada model elastis linier yang sekaligus sebagai dasar untuk model-model lainnya. Hukum Hooke adalah

$$\begin{bmatrix} \dot{\sigma}'_{xx} \\ \dot{\sigma}'_{yy} \\ \dot{\sigma}'_{zz} \\ \dot{\sigma}'_{xy} \\ \dot{\sigma}'_{yz} \\ \dot{\sigma}'_{zx} \end{bmatrix} = \frac{E'}{(1-2\nu')(1+\nu')} \begin{bmatrix} 1-\nu' & \nu' & \nu' & 0 & 0 & 0 \\ \nu' & 1-\nu' & \nu' & 0 & 0 & 0 \\ \nu' & \nu' & 1-\nu' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}'_{xx} \\ \dot{\varepsilon}'_{yy} \\ \dot{\varepsilon}'_{zz} \\ \dot{\varepsilon}'_{xy} \\ \dot{\varepsilon}'_{yz} \\ \dot{\varepsilon}'_{zx} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Matriks kekakuan material elastis sering dinotasikan dengan $\underline{\underline{D}}^e$. E' adalah modulus elastsitas efektif dan ν' adalah rasio Poisson efektif, namun kedua simbol ini pada Plaxis tanpa menggunakan tanda ($'$).

Mengacu pada Hukum Hooke, maka diperoleh hubungan berikut

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.33)$$

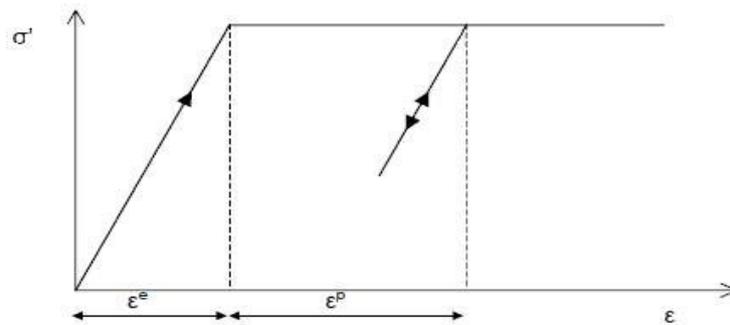
$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (3.34)$$

$$E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (3.35)$$

Dimana G adalah modulus geser, K adalah modulus *bulk*, dan E_{oed} merupakan parameter alternatif yang dihitung secara otomatis oleh program Plaxis berdasarkan input E dan ν .

Model Mohr-Coulomb

Prinsip dasar elastoplastisitas adalah regangan dipisahkan ke dalam bagian elastis dan plastis (Persamaan (3.30)), dan hal yang sama pada kecepatan regangan. Gambar 3.19 merepresentasikan hal tersebut.



Gambar 3.19 Ide dasar model elastis plastis sempurna.

Substitusi Persamaan (3.30) ke Persamaan (3.32) diperoleh

$$\underline{\dot{\sigma}}' = \underline{\underline{D}}^e \underline{\dot{\epsilon}}^e = \underline{\underline{D}}^e (\underline{\dot{\epsilon}} - \underline{\dot{\epsilon}}^p) \quad (3.36)$$

Kondisi leleh Mohr-Coulomb yang termobilisasi penuh terdiri atas enam fungsi leleh bila diformulasikan dalam bentuk tegangan-tegangan prinsipal, yakni

$$f_{1a} = \frac{1}{2}(\sigma_2' - \sigma_3') + \frac{1}{2}(\sigma_2' + \sigma_3')\sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \quad (3.37a)$$

$$f_{1b} = \frac{1}{2}(\sigma_3' - \sigma_2') + \frac{1}{2}(\sigma_3' + \sigma_2')\sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \quad (3.37b)$$

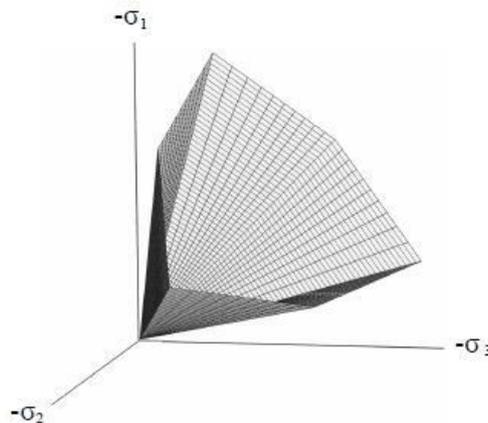
$$f_{2a} = \frac{1}{2}(\sigma_3' - \sigma_1') + \frac{1}{2}(\sigma_3' + \sigma_1')\sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \quad (3.37c)$$

$$f_{2b} = \frac{1}{2}(\sigma_1' - \sigma_3') + \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_3')\sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \quad (3.37d)$$

$$f_{3a} = \frac{1}{2}(\sigma_1' - \sigma_2') + \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_2')\sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \quad (3.37e)$$

$$f_{3b} = \frac{1}{2}(\sigma_2' - \sigma_1') + \frac{1}{2}(\sigma_2' + \sigma_1')\sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \quad (3.37f)$$

Dua parameter model plastis yang muncul pada kondisi leleh adalah sudut gesek, φ dan kohesi, c . Dalam hal fungsi leleh tiap individual persamaan di atas memenuhi kondisi $f_i = 0$ maka seluruh fungsi leleh tersebut secara bersama menggambarkan sebuah kerucut heksagonal di dalam ruang tegangan prinsipal, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.20. Untuk tanah yang padat maka peningkatan regangan volumetrik plastis positif digunakan fungsi potensial plastis yang juga terdiri atas 6 komponen.



Gambar 3.20 Permukaan leleh Mohr-Coulomb di dalam tegangan prinsipal.

Model Mohr-Coulomb memerlukan sebanyak 5 parameter dasar yang dapat ditentukan dengan pengujian dasar pada contoh tanah. Kelima parameter tersebut

adalah: E = modulus Young (kN/m^2), ν = rasio Poisson, φ = sudut gesek ($^\circ$), c = kohesi (kN/m^2), dan ψ = sudut dilatansi ($^\circ$). Modulus tangen E_0 digunakan bilamana material mempunyai rentang elastis linier yang besar, dan untuk pembebanan tanah umumnya digunakan modulus sekan pada 50% kekuatan material, E_{50} . Pada kondisi *unloading* seperti terowongan dan ekskavasi, maka diperlukan E_{ur} .

Nilai rasio Poisson, ν yang lebih rendah digunakan pada kondisi *unloading*, serta tanah lunak atau *loose*. Program Plaxis dapat pula menangani tanah pasir non kohesif ($c = 0$). Namun guna menghindari kesulitan analisis maka dianjurkan menggunakan kohesi yang rendah (misalnya $c = 0,2$ kPa). Adapun sudut gesek φ yang rendah dipakai untuk tanah kohesif jenuh ataupun lunak, dan sudut gesek yang lebih besar untuk pasir padat. Pada tanah yang terkonsolidasi sangat berlebihan, termasuk lempung cenderung mempunyai dilatansi yang kecil ($\psi \approx 0$). Dilatansi pasir bergantung pada kepadatan dan sudut gesek yang besarnya dapat ditentukan sebagai $\psi = \varphi - 30^\circ$, sedangkan untuk $\psi < 30^\circ$ maka sudut dilatansi kebanyakan adalah nol. Untuk pasir lepas kondisi ekstrim dapat digunakan nilai ψ yang negatif.

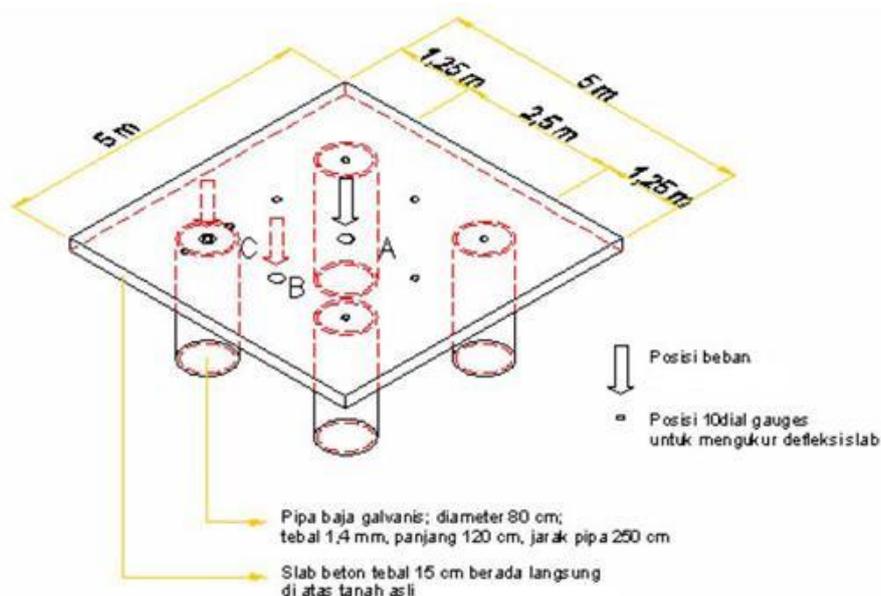
IV. METODE PENELITIAN

A. Data dan Tahapan Analisis

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan data hasil uji skala penuh Sistem Cakar Ayam Modifikasi (CAM) di Waru Jawa Timur (Suhendro, 2006). Adapun langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian ini adalah

1. Persiapan, meliputi perizinan penelitian dll.;
2. Pengumpulan dan resume data;
3. Analisis dan interpretasi;
4. Penyusunan laporan penelitian;
5. Publikasi hasil penelitian (seminar).

Tipikal CAM Waru ditunjukkan pada Gambar 4.1 dan sifat-sifat materialnya diberikan pada Tabel 4.1. Untuk modulus elastisitas tanah, E_s ditentukan berdasarkan korelasi nilai koefisien *subgrade* vertikal, k_v dengan modulus elastisitas berdasarkan Persamaan Vesic ($k_v = E_s/B(1-\nu)$), maka untuk k_v sebesar 5.000 kN/m^3 (Firdiansyah, 2010) diperoleh E_s sebesar 12.500 kN/m^2 . Parameter tanah lainnya untuk analisis pada fondasi CAM diberikan pada Tabel 4.2. Model tanah yang digunakan adalah model Mohr-Coulomb dengan koefisien *interface* lempung lunak-beton sebesar 0,8 dan lempung lunak-baja sebesar 0,5.



Gambar 4.1 Tipikal CAM Waru (Firdiansyah, 2010).

Tabel 4.1 Data pada Analisis CAM Waru (Firdiansyah, 2010)

No	Parameter	Satuan	Nilai
1.	Modulus <i>subgrade</i> vertikal tanah (k_v)	kN/m ³	5.000
2.	Modulus <i>subgrade</i> horizontal tanah (k_h)	-	$1 \times k_v$
3.	Material beton		
	Berat volume beton	kN/m ³	24
	Kuat tekan beton yang disyaratkan, f_c'	MPa	25
	Modulus Elastisitas beton, E_c	kN/m ²	23.500.000
	Angka poisson, μ	-	0,15
4.	Material baja (BJ 37)		
	Berat volume baja	kN/m ³	78,5
	Modulus Elastisitas baja, E_s	MPa	200.000
	Angka poisson, μ	-	0,3
	Tegangan leleh, f_y	MPa	240
	Tegangan putus, f_u	MPa	370
5.	Dimensi pelat beton bertulang		
	Panjang, L	m	5,0
	Lebar, B	m	5,0
	Tebal, h	cm	15
6.	Dimensi pipa cakar baja		
	Panjang	m	1,2
	Diameter	m	0,8
	Tebal	m	0,0014
	Jarak antar cakar	m	2,5
7.	Beban (<i>single wheel</i> ekuivalen jalan raya)	kN	40

B. Dimensi dan Konfigurasi Tiang Sistem Pelat Terpaku

Dimensi dan bahan pelat pada Sistem Pelat Terpaku adalah sama dengan dimensi CAM Waru yaitu 5 m × 5 m dan tebal 15 cm berbahan beton bertulang dengan sifat-sifat beton mengacu pada Tabel 4.1. Adapun tiang didesain berdiameter (d) 20 cm berbahan beton bertulang dengan sifat beton sama dengan sifat beton pelat. Sistem Pelat Terpaku yang akan dianalisis dibedakan atas 2 (dua) konfigurasi tiang yaitu konfigurasi 4 tiang × 4 tiang (rasio jarak tiang terhadap diameter, $s/d = 6,25$) dan konfigurasi 5 tiang × 5 tiang (rasio $s/d = 5,00$). Adapun panjang tiang

divariasikan sebesar 1,00 m; 1,50 m; dan 2,0 m. Selanjutnya dimensi dan konfigurasi Sistem Pelat Terpaku diberikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.2 Parameter Tanah

No.	Parameter	Nama/ simbol	Lempung Waru	Satuan
1	Model material	Model	Mohr-Coulomb	-
2	Perilaku material	Tipe	<i>Undrained</i>	-
3	Berat volume tak jenuh	γ	16	kN/m ³
4	Berat volume jenuh	γ_{sat}	17	kN/m ³
5	Modulus Young	E	12.500	kN/m ²
6	Rasio Poisson	ν	0,35	-
7	Kohesi	c	20	kN/m ²
8	Sudut gesek	ϕ	0	°
9	Sudut dilatasi	ψ	0	°
10	Faktor reduksi <i>interface</i> :			
	Lempung lunak-beton	R_{inter}	0,8	-
	Lempung lunak-baja	R_{inter}	0,5	-
11	Koefisien tekanan tanah lateral	K_0	0,913	-

Tabel 4.3 Data untuk Analisis Sistem Pelat Terpaku

No	Parameter	Satuan	Nilai
1.	Material beton		
	Berat volume beton	kN/m ³	24
	Kuat tekan beton yang disyaratkan, f_c'	MPa	25
	Modulus Elastisitas beton, E_c	kN/m ²	23.500.000
	Angka poisson, μ	-	0,15
2.	Dimensi pelat beton bertulang		
	Panjang, L	m	5,0
	Lebar, B	m	5,0
	Tebal, h	cm	15
3.	Dimensi tiang		
	Panjang, L_p	m	1,0; 1,5; 2,0
	Diameter, d	m	0,2
	Jarak antar tiang, s	m	1,25; 1,00
4.	Beban (<i>single wheel</i> ekuivalen jalan raya)	kN	40

C. Metode Analisis

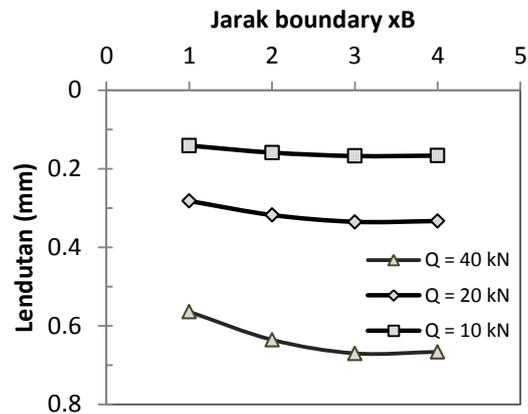
Cara analisis dilakukan sebagai berikut: validasi data hasil uji skala penuh Sistem Cakar Ayam Modifikasi di Waru, dan analisis numerik Sistem Pelat Terpaku dengan menggunakan data dari CAM Waru, dan membandingkan deformasi hasil analisis Sistem Pelat Terpaku dengan CAM Waru. Analisis numerik dilakukan dengan bantuan program aplikasi Plaxis 3D v.1.5, dimana *input material properties* struktur yang diperlukan dan besarnya disajikan pada Tabel 4.4. Cakar ayam dimodelkan sebagai cangkang (*shell*) berperilaku linier elastis dengan *outside* dan *inside interface*, sedangkan pelat beton sebagai *floor* dengan perilaku linier elastis beserta *interface* pada sisi bawah. Ditinjau pembebanan yang bekerja di pusat pelat, dengan besar beban mulai 0 kN, 10 kN, 20 kN, dan 40 kN. Kondisi batas (*boundary condition*) diambil sebesar 10 m (2B) di sekeliling konstruksi dan 10 m pada arah kedalaman dari muka tanah. Hasil *path test* ditunjukkan pada Gambar 4.2.

Tabel 4.4 Material *Properties* Struktur

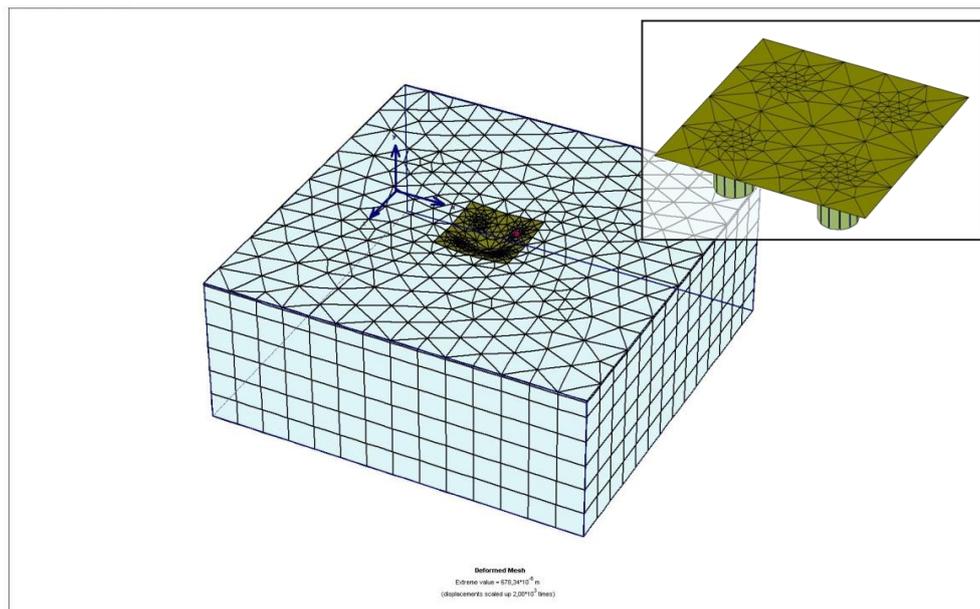
No.	Parameter	Nama/ simbol	CAM	Tiang	Pelat	Satuan
1	Model material	Model	Elemen shell	Linier elastik	Floor	-
2	Perilaku material	Tipe	Linier elastik	Non porous	Linier elastik	-
3	Tebal atau diameter	d	0,0014	0,2	0,15	m
4	Berat volume	γ	78,5	24	24	kN/m ³
5	Modulus Young	E	$2,1 \times 10^8$	$2,35 \times 10^7$	$2,35 \times 10^7$	kN/m ²
6	Modulus geser	G	$9,545 \times 10^7$	$1,022 \times 10^7$	$1,022 \times 10^7$	kN/m ²
7	Rasio Poisson	ν	0,1	0,15	0,15	-

Tipikal *element mesh* (berdasarkan *automatic generation*) untuk analisis CAM Waru pada Plaxis ditunjukkan pada Gambar 4.3. Cakar menggunakan elemen *shell* dengan *inside* dan *outside interface*. Oleh karena nilai modulus elastisitas tanah Waru tidak tersedia, maka nilai tersebut ditentukan dengan perhitungan menggunakan Rumus Vesic sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya. Untuk itu perlu dilakukan analisis validasi modulus elastisitas tanah, E_s dengan program aplikasi Plaxis 3D Foundation dan hasilnya diberikan pada Tabel 4.4 dan Gambar 4.4, dimana bebannya

adalah beban sentris. Untuk nilai modulus elastistas tanah sebesar 17.500 kN/m^2 memberikan hasil lendutan yang sama dengan pengamatan. Nilai modulus tersebut lebih besar dibanding hasil perhitungan menggunakan Rumus Vesic.



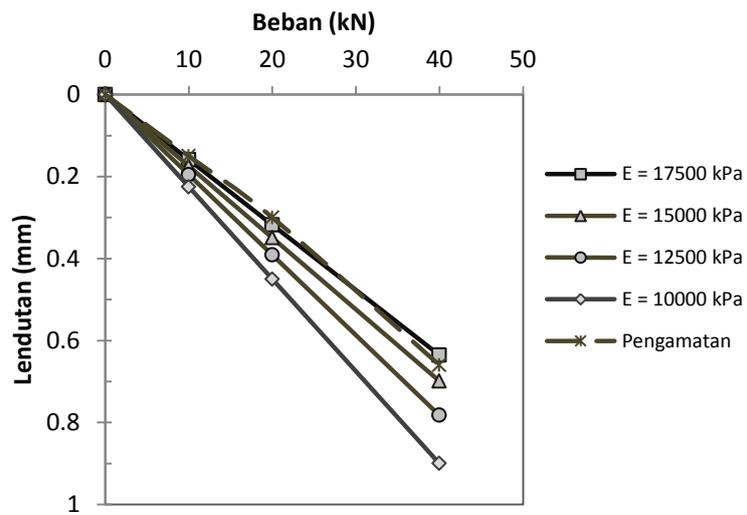
Gambar 4.2 Hasil *path test* CAM Waru.



Gambar 4.3 Tipikal *element mesh* pada analisis CAM Waru. *Insert*: struktur CAM.

Tabel 4.4 Hasil Analisis Lendutan untuk Berbagai Nilai E_s pada Beban Sentris

Beban (kN)	Pengamatan	Plaxis 3D, E_s (kPa)			
		17.500	15.000	12.500	10.000
0	0	0	0	0	0
10	0,15	0,16	0,17	0,20	0,23
20	0,30	0,32	0,35	0,39	0,45
40	0,66	0,64	0,70	0,78	0,90

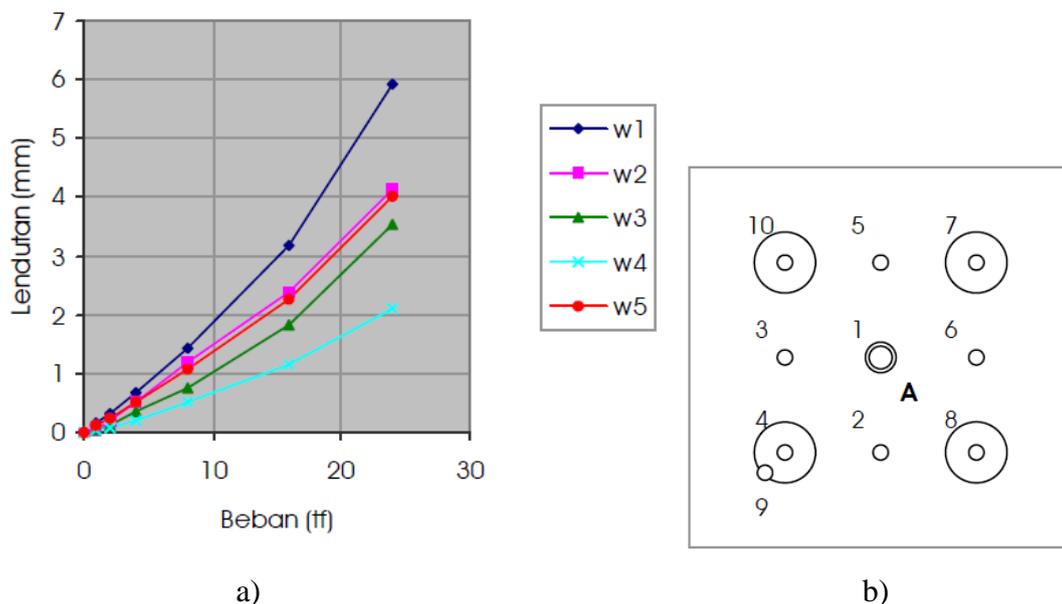


Gambar 4.4 Perbandingan hasil analisis lendutan untuk berbagai nilai E_s .

V. PERBANDINGAN PERKERASAN SISTEM CAM DAN PELAT TERPAKU

A. Hasil Pengamatan Lendutan Sistem Cakar Ayam Modifikasi

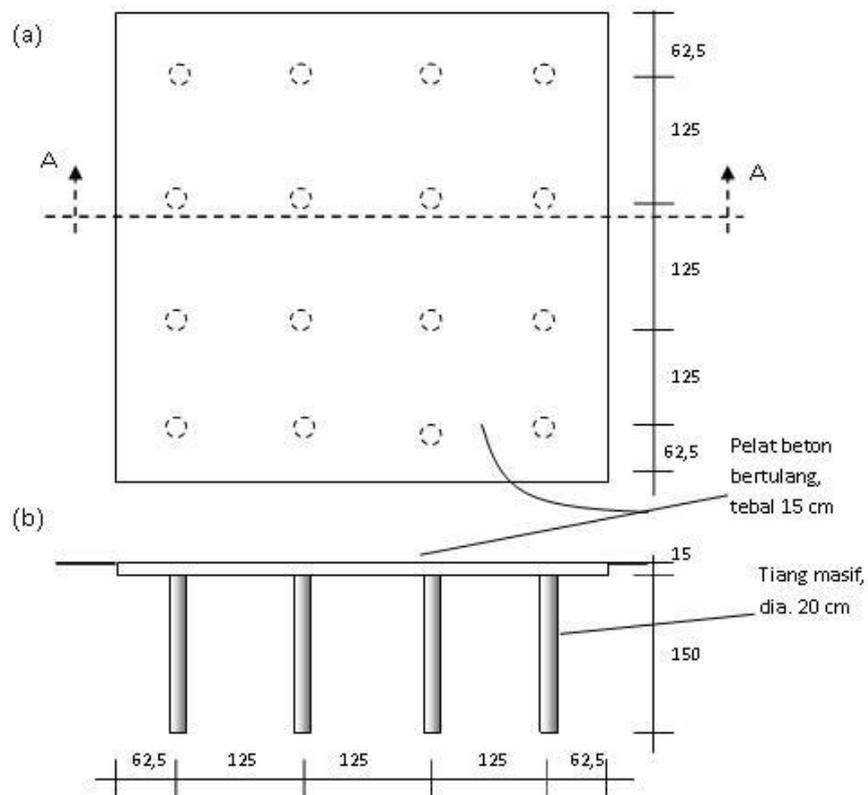
Hasil pengamatan uji skala penuh CAM di pusat pelat (titik A) diambil dari uji beban monotonik karena uji beban monotonik hanya dilakukan pada titik tersebut, sedangkan untuk titik lainnya diambil dari pengujian beban repetitif. Gambar 5.1 memberikan hubungan $P-\delta$ akibat pembebanan sentris di tengah pelat (titik A). CAM menunjukkan kekakuan yang besar dimana hingga beban 24 ton (240 kN), lendutan yang terjadi hanya 5,94 mm dan perilaku linier-elastik mencapai beban 16 ton. Titik-titik lainnya yang lebih jauh dari beban mengalami lendutan yang lebih rendah. Perilaku *deflected-bowle* berbentuk mangkok yang mengindikasikan bahwa sistem mampu memberikan respons yang sama ke segala arah. Pada beban 4 ton (beban roda tunggal), lendutan yang terjadi sangat kecil yaitu 0,66 mm.



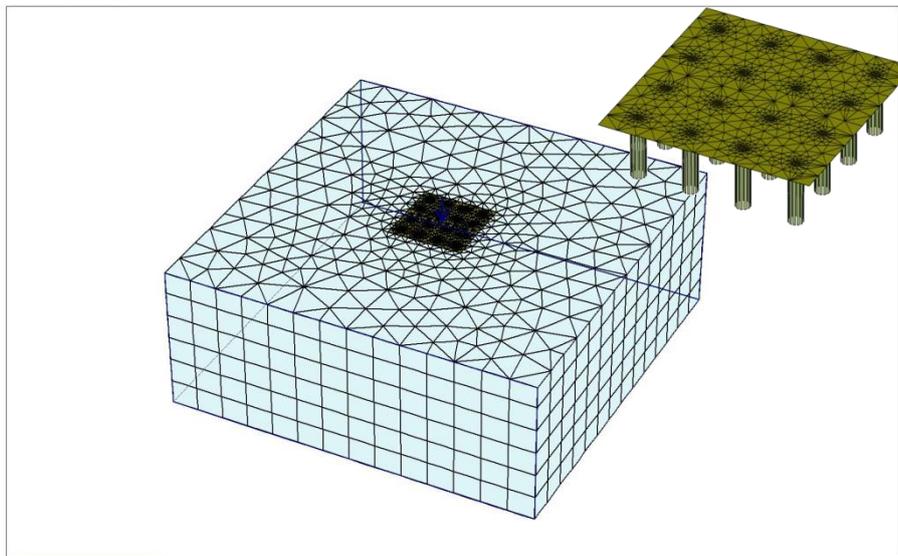
Gambar 5.1 Hasil uji skala penuh Sistem CAM Waru; a) $P-\delta$, b) Denah posisi titik pengamatan (Suhendro, 2006).

B. Sistem Pelat Terpaku

Adapun tipikal Sistem Pelat Terpaku dengan 4 baris tiang (4×4) disajikan pada Gambar 5.2 dimana digunakan sifat tanah dan beton sebagaimana pada CAM Waru. Sistem tersebut menggunakan pelat beton bertulang tebal 15 cm dimodelkan sebagai *floor*. Tiang berdiameter 20 cm dipasang dengan jarak antar tiang s sebesar 1,25 m (rasio $s/d = 6,25$). Adapun panjang tiang adalah 1,50 m. Tiang ini menggunakan model solid linier elastik dimana tipe perilakunya *non porous* dengan *outside interface* dan parameternya sebagaimana diberikan pada Tabel 4.3. Tipikal *element mesh* untuk analisis Sistem Pelat Terpaku untuk 4×4 baris tiang diberikan pada Gambar 5.3.



Gambar 5.2 Tipikal Sistem Pelat Terpaku untuk 4 Baris Tiang (4×4);
(a) Denah, (b) Tampak.



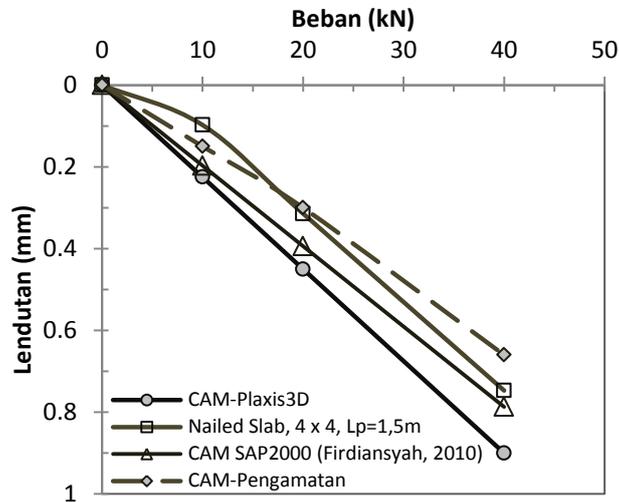
Gambar 5.3 Tipikal *element mesh* pada analisis Sistem Pelat Terpaku. *Insert*: struktur Pelat Terpaku 4×4 tiang.

D. Perbandingan Sistem Cakar Ayam Modifikasi dan Sistem Pelat Terpaku

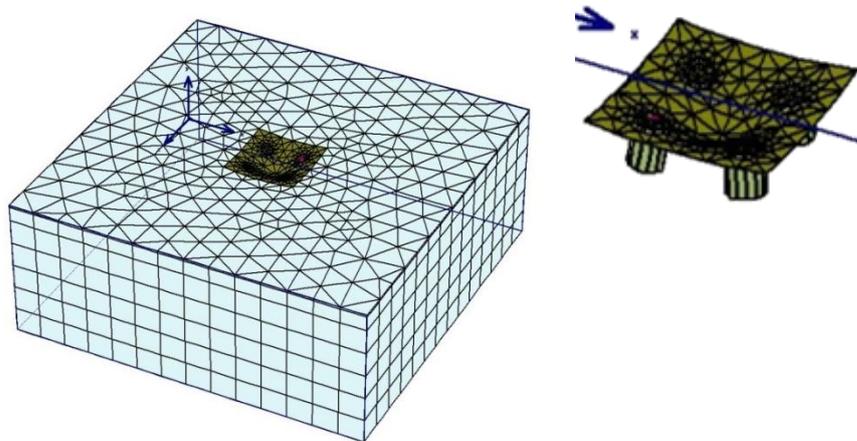
D.1 Beban sentris

Hasil-hasil analisis lendutan dan pengamatan CAM untuk beban sentris ditunjukkan pada Gambar 5.4. Berat sendiri konstruksi diabaikan untuk melihat besarnya lendutan yang diakibatkan oleh beban luar. Hasil analisis Plaxis 3D diperoleh lendutan sebesar 0,68 mm yang relatif sama dengan pengamatan (perbedaan 2,78%). Adapun hasil lendutan dari Sistem Pelat Terpaku 4×4 tiang adalah sebesar 0,54 mm lebih rendah 18,70% dibanding dengan pengamatan CAM. Luas bidang kontak tanah dengan tiang adalah 15,07 m², hanya 75% dari luas bidang kontak cakar ayam (20,01 m²). Oleh karena itu reduksi penurunan pada Sistem Pelat Terpaku 4×4 tiang adalah kontribusi dari tahanan gesek tiang yang melawan gaya tekan dan gaya angkat pada pelat. Tahanan gesek tiang tersebut meningkatkan kekakuan pelat dalam melawan lendutan, sehingga lendutan pelat menjadi berkurang. Lendutan pelat perkerasan kaku konvensional hanya 60% dari lendutan pengamatan CAM. Namun demikian, dalam hal beban berulang maka pelat pada tanah lunak akan mudah bergeser sehingga terbentuk rongga di bawah pelat, sehingga dukungan tanah

menjadi berkurang yang berakibat pada pecahnya pelat perkerasan. Bentuk deformasi pada CAM dan Sistem Pelat Terpaku ditunjukkan pada Gambar 5.5 dan 5.6.



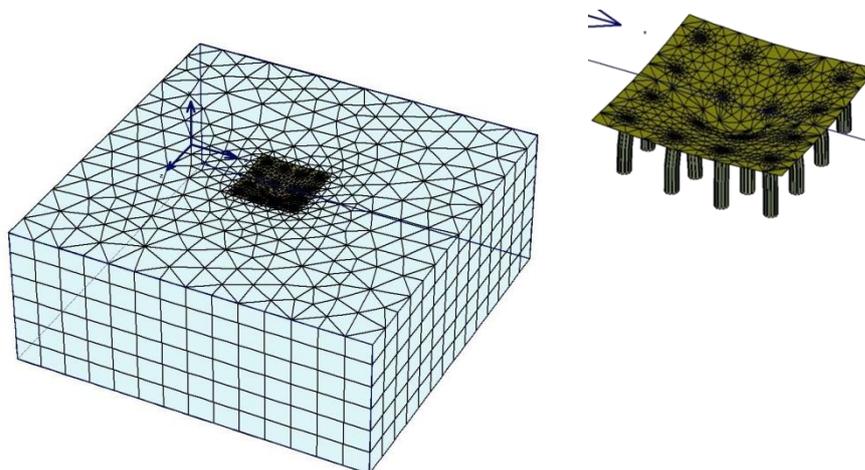
Gambar 5.4 Perbandingan hasil pengamatan CAM Waru dan analisis CAM, serta Sistem Pelat Terpaku untuk beban sentris.



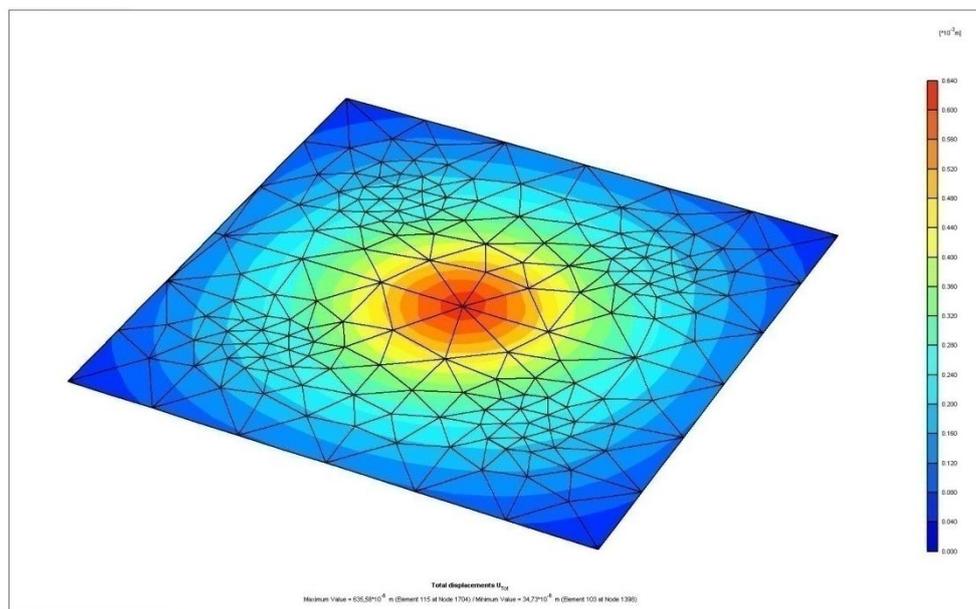
Gambar 5.5 Bentuk deformasi *mesh* pada CAM untuk beban sentris $Q = 40$ kN.

Pada Gambar 5.7 dan 5.8 berturut-turut ditunjukkan distribusi penurunan pada pelat. Sistem CAM dan Pelat Terpaku menunjukkan perilaku yang sama dimana keduanya membuat pelat tetap kontak dengan tanah (tidak terdapat *displacement* negatif), sedangkan lendutan minimum mendekati nol. Lendutan minimum pada perkerasan kaku konvensional sebesar 0,11 mm. Akan distribusi lendutan pada

Sistem CAM dan Pelat Terpaku cenderung terkonsentrasi di sekitar beban. Dengan demikian keawetan pelat pada Sistem CAM dan Pelat Terpaku diharapkan menjadi lebih terjaga.



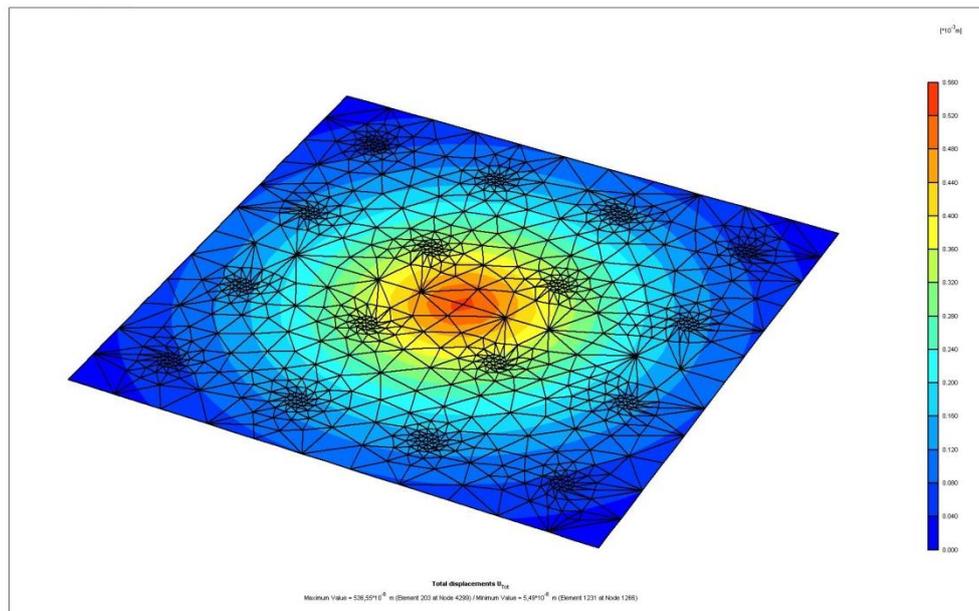
Gambar 5.6 Bentuk deformasi *mesh* pada Sistem Pelat Terpaku 4×4 tiang untuk beban sentris $Q = 40$ kN.



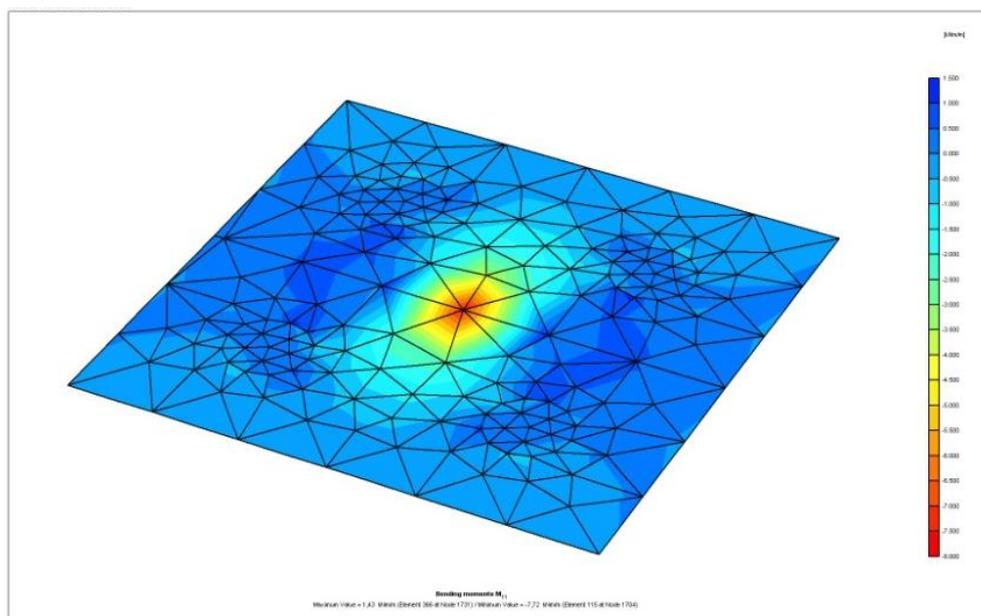
Gambar 5.7 Distribusi penurunan pada Sistem CAM Waru untuk beban sentris $Q = 40$ kN ($S_{maks} = 0,68$ mm, $S_{min} = 0,016$ mm).

Distribusi momen lentur Pelat Terpaku diberikan pada Gambar 5.9 dan 5.10. Pada Sistem CAM memberikan perbandingan momen positif dan negatif yang relatif

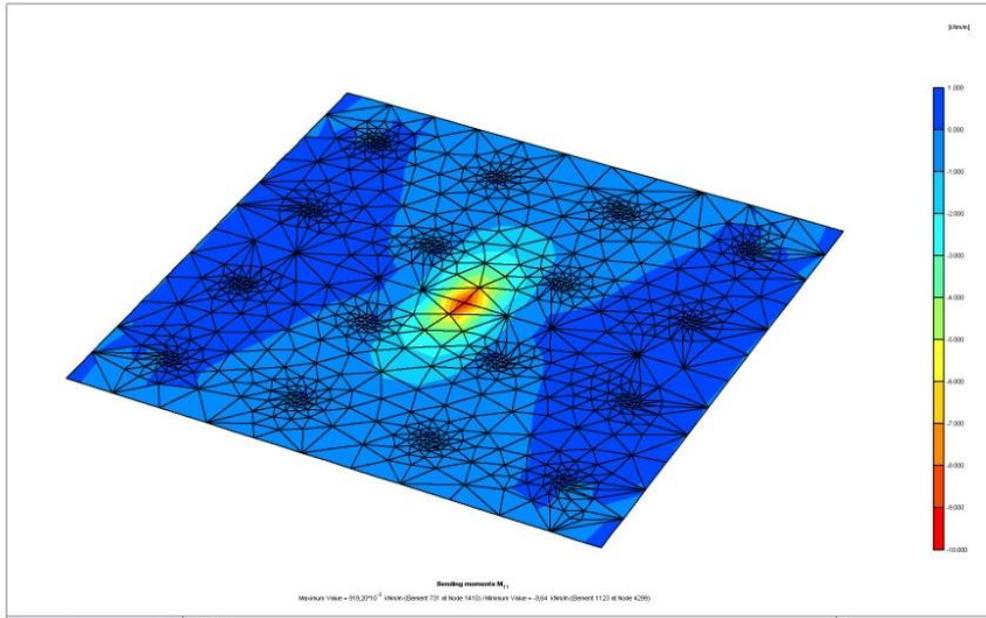
seimbang ($M_{\min} = 5 \times M_{\max}$, $M_{\max} = 1,43 \text{ kNm/m}$), sedangkan pada Sistem Pelat Terpaku momen negatif lebih dominan ($M_{\min} = 10 \times M_{\max}$, $M_{\max} = 0,92 \text{ kNm/m}$) sehingga diperlukan luasan tulangan negatif yang sedikit lebih besar. Momen negatif Sistem Pelat Terpaku terkonsentrasi pada luasan yang lebih kecil di sekitar beban.



Gambar 5.8 Distribusi penurunan pada Sistem Pelat Terpaku 4×4 baris tiang untuk beban sentris $Q = 40 \text{ kN}$ ($S_{\max} = 0,54 \text{ mm}$, $S_{\min} = 0,005 \text{ mm}$).



Gambar 5.9 Distribusi momen lentur pada Sistem CAM Waru untuk beban sentris $Q = 40 \text{ kN}$ ($M_{\max} = 1,43 \text{ kNm/m}$, $M_{\min} = 7,72 \text{ kNm/m}$).



Gambar 5.10 Distribusi momen lentur pada Sistem Pelat Terpaku 4×4 baris tiang untuk beban sentris $Q = 40$ kN ($M_{\text{maks}} = 0,92$ kNm/m, $M_{\text{min}} = 9,64$ kNm/m).

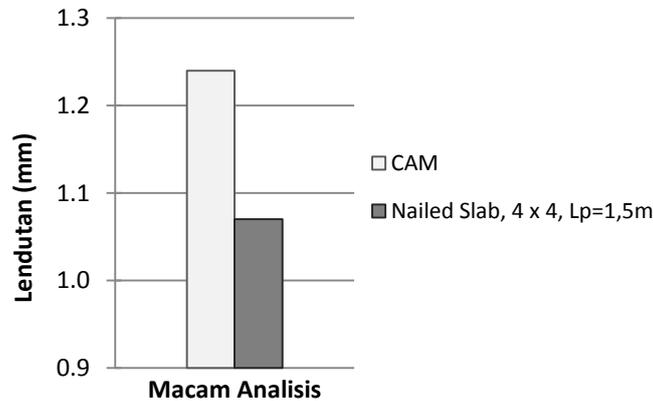
D.2 Beban di pinggir

Beban dengan intensitas 0 kN, 10 kN, 20 kN, dan 40 kN diberikan pada ujung pinggir pelat, tepatnya pada jarak 10 cm dari pinggir pelat. Hasil analisis lendutan diberikan pada Gambar 5.11. Terlihat bahwa lendutan CAM (1,24 mm dengan lendutan minimum 0,00 mm) sedikit lebih besar dibanding Pelat Terpaku (1,07 mm dengan lendutan minimum 0,011 mm). Pada Sistem CAM memberikan perbandingan momen positif dan negatif yang relatif seimbang ($M_{\text{maks}} = 3,96$ kNm/m, $M_{\text{min}} = -3,40$ kNm/m), sedangkan pada Sistem Pelat Terpaku momen juga relatif seimbang ($M_{\text{maks}} = 3,43$ kNm/m, $M_{\text{min}} = -5,43$ kNm/m) sehingga diperlukan luasan tulangan negatif yang sedikit lebih besar.

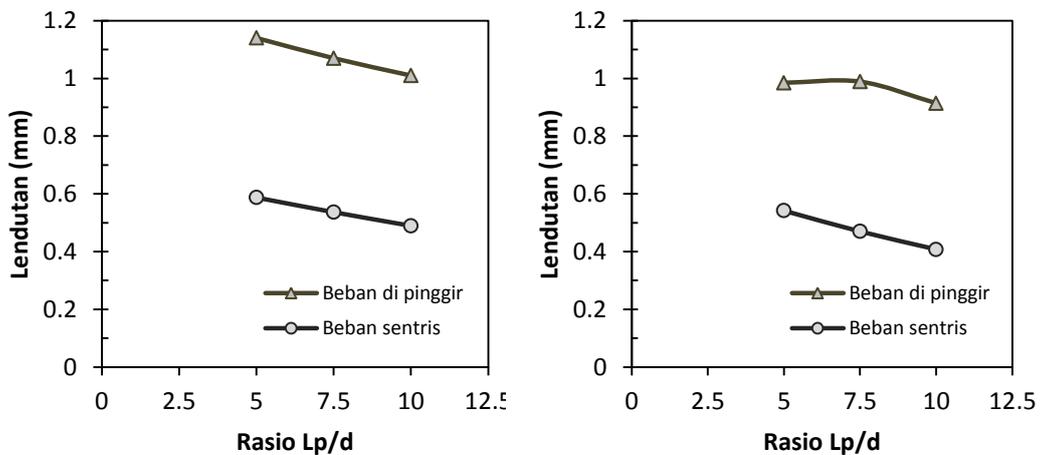
D.3 Pengaruh panjang dan jarak tiang pada Sistem Pelat Terpaku

Pada bagian ini akan diberikan bagaimana pengaruh rasio panjang-diameter tiang (L_p/d) terhadap lendutan Sistem Pelat Terpaku. Ditinjau rasio L_p/d sebesar 5; 7,5 dan 10, dimana diameter tiang sebesar $d = 20$ cm sehingga panjang tiang masing-masing sebesar 1,00 m, 1,50 m, dan 2,00 m. Rasio L_p/d yang semakin besar menghasilkan lendutan yang semakin kecil (Gambar 5.12), oleh karena *interface*

tiang semakin luas sebagai akibat dari semakin panjangnya tiang, sehingga tahanan tiang juga bertambah. Hal ini berlaku untuk kedua macam pembebanan, yaitu beban sentris dan beban di pinggir.



Gambar 5.11 Perbandingan hasil analisis CAM dan Sistem Pelat Terpaku. pada beban ujung pinggir $Q = 40$ kN.



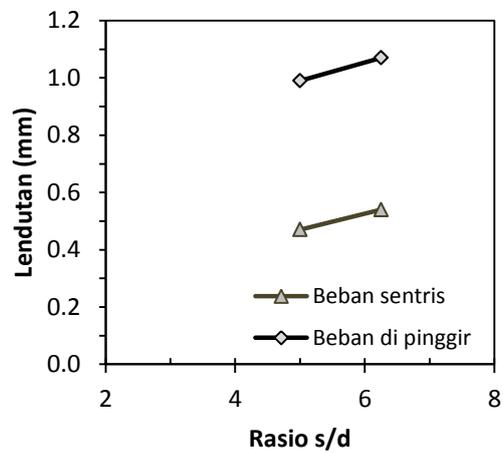
a). 4×4 tiang

b). 5×5 tiang

Gambar 5.12 Hubungan lendutan terhadap rasio L_p/d pada Sistem Pelat Terpaku.

Pengaruh jarak antar tiang s dengan rasio s/d sebesar 5 dan 6,25 ditunjukkan pada Gambar 5.13 untuk $L_p = 1,50$ m, sehingga variasi jarak antar tiang adalah 1,00 m dan 1,25 m. Ukuran pelat tetap sebesar 5 m x 5 m, maka untuk rasio s/d sebesar 5 dan 6,25 berturut-turut mempunyai jumlah tiang sebanyak 25 dan 16 tiang. Terlihat

bahwa semakin besar rasio s/d maka lendutan pelat semakin besar pula, oleh karena jarak antar tiang juga semakin besar.



Gambar 5.13 Hubungan lendutan terhadap rasio s/d pada Sistem Pelat Terpaku untuk $L_p = 1,50$ m.

VI. KESIMPULAN

Didasarkan atas uraian dan analisis dari bab-bab sebelumnya, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut

1. Perencanaan perkerasan kaku yang telah banyak distandarisasi, pada umumnya untuk desain perkerasan yang terletak di atas tanah dasar kompatibel (mempunyai kuat dukung yang baik atau memadai). Walaupun demikian, potensi kerusakan perkerasan akibat beban lalu lintas dan pengaruh lingkungan masih tetap ada. Akan tetapi pada kondisi tanah dasar yang tidak kompatibel seperti tanah lunak hingga sangat lunak dimana kuat dukungnya tidak memadai untuk memikul beban lalu lintas, ataupun tanah ekspansif, maka diperlukan suatu teknologi perkerasan kaku yang mampu mereduksi kelemahan tanah dasar tersebut. Untuk masalah ini, teknologi perkerasan kaku yang telah dikembangkan antara lain perkerasan pada timbunan yang telah dilakukan perbaikan tanah, timbunan di atas tiang-tiang (dapat berupa *individual pile cap* maupun *continuous pile cap*), fondasi perkerasan jalan sistem tiang matras beton, konstruksi sarang laba-laba, dan perkerasan dengan fondasi cakar ayam, serta yang sedang dikembangkan adalah perkerasan kaku menggunakan Sistem Pelat Terpaku (*nailed slab system*). Masing-masing teknologi mempunyai kelebihan dan kekurangan.
2. Kinerja perkerasan dengan Sistem Pelat Perpaku diharapkan menyerupai kinerja Sistem Cakar Ayam Modifikasi (CAM), dimana tiang-tiang pendek yang ditempatkan di bawah perkerasan berfungsi sebagai pengaku pelat dan angkur ketika terjadi beban lalu lintas dan beban termal. Perlu diingat, bahwa kedua beban tersebut merupakan beban siklik dan repetitif. Telah ditunjukkan dengan analisis numerik bahwa kinerja Sistem Pelat Terpaku (4×4 tiang dan 5×5 tiang) pada lebar pelat yang sama memberikan kinerja yang cenderung lebih baik dibanding Sistem CAM. Lendutan yang terjadi pada Sistem Pelat Terpaku cenderung lebih rendah dibanding Sistem CAM dan terdistribusi pada area yang

lebih sempit (terkosentarsi di dekat beban). Hal yang sama juga terjadi pada distribusi momen pelat.

3. Pada Sistem Pelat Terpaku, penambahan panjang tiang ataupun pengurangan jarak antar tiang akan meningkatkan kinerja sistem dimana lendutan semakin berkurang.
4. Bilamana jalan akan dibangun melintasi tanah lunak yang cukup tebal sedangkan jalan tersebut cukup panjang, tentu perlu material timbunan yang banyak untuk membangun badan jalan. Jika dilakukan penggalian material dimana tanah dasar digali maka bekas galian akan terbentuk seperti kanal yang tentunya memerlukan material timbunan yang banyak pula. Di sisi lain, material galian menimbulkan masalah baru yang juga harus ditangani. Untuk itu perkerasan kaku dengan Sistem Pelat Terpaku dapat menjadi alternatif yang lebih ekonomis. Ekonomis dari segi pembangunan dan perawatannya serta usia layan yang lebih panjang.

REFERENSI

- AASHTO, 1993, *Guide for Design of Pavement Structure*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington.
- Ausroads, 1992, *Pavement Design: A Guide to the Structural Design of Road Pavements*, Ausroads, Sydney.
- Bowles, J. E., 1997, *Foundation Analysis and Design*, 5th ed., The McGraw-Hill Companies, Inc., New York.
- Breitenbücher, R. dan Sievering, C., 2008, Cracking in Concrete Pavements – an Interaction of Various Influences, *Pavement Cracking*, Al-Qadi, Scarpas & Loizos (eds), Taylor & Francis Group, London, pp. 127-136.
- Delatte, N., 2008, *Concrete Pavement Design, Construction, and Performance*, Taylor & Francis, London. Pp. 62-71.
- Desrihadi, R., 2001, Uji Beban Fondasi Tiang dengan *Pile Cap* Tipis pada Tanah Lempung, *Tugas Akhir*, Program Studi Teknik Sipil, Program Sarjana UGM, Yogyakarta, Indonesia.
- 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, Indonesia.
- Firdiansyah, A., 2010, Evaluasi Dimensi Sistem Cakar Ayam Akibat Pengaruh Variasi Letak Beban dan Kondisi Tanah, *Tesis*, Magister Program Pengelolaan Sarana Prasarana (MPSP) Jurusan Ilmu-ilmu Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Fwa, T.F., dan Wei, L., 2006, Design of Rigid Pavement, Chapter 9, *Handbook of Highway Engineering*, T.F. Fwa (ed), Taylor & Francis Group, London.
- Griffiths, G. dan Thom, N., 2007, *Concrete Pavement Design Guidance Notes*, Taylor & Francis, London.
- 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, sub mitted in *Dinamika Teknik*.
- Hardiyatmo, H.C., 2010, *Perancangan Sistem Cakar Ayam Modifikasi untuk Perkerasan Jalan Raya*, Gadjah 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 IJCE-IJENS*, Vol. 11 No. 4, pp. 22-28.

- Hardiyatmo, H.C., B. Suhendro, dan Sumiyanto, 2002, Analisis Lendutan Pelat yang Didukung oleh Kelompok Tiang pada Tanah Lunak, *Prosiding PIT Geoteknik 2002*, Surabaya 30-31 Oktober 2002, pp. III-29—III-33.
- Huang, Y. H., 2004, *Pavement Analysis and Design*, 2nd ed, Pearson Prentice Hall, New Jersey.
- Kohler, E. dan Kannekanti, V., 2008, Influence of the Coefficient of Thermal Expansion on the Cracking of Jointed Concrete Pavements, *Pavement Cracking*, Al-Qadi, Scarpas & Loizos (eds.), Taylor & Francis Group, London, pp. 69-77.
- Mathew, T.V., dan Rao, K.V., 2007, *Introduction to Transportation Engineering*, NPTEL, May 2007, p. 29-3.
- 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.
- Pichumani, R., Crawford, J.E., dan Triandafilidas, G.E., 1974, Finite Element Analysis of Pile-Supported Pavement System, (abstract) *Journal of Transportation Engineering Division*, Vol. 100. No. 2, ASCE, <http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?7400508>, tanggal akses: 13 November 2009.
- Plaxis 3D Foundation, *Material Models Manual version 1.5*.
- Plaxis 3D Foundation, *Scientific Manual version 1.5*.
- Puri, A., 2015, Perilaku Perkerasan Sistem Pelat Terpaku pada Lempung Lunak, *Disertasi*, Program Doktor Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- 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 Pertemuan Ilmiah Tahunan XIV HATTI*, 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, 4 December, 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.
- Puri, A., Hardiyatmo, H.C., Suhendro, B., dan Rifa'i, A., 2013c, Application of Method of Nailed-slab Deflection Analysis on Full Scale Model and Comparison to Loading Test, *Proc. the 7th National Conference of Civil*

- Engineering (KoNTekS7)*, Universitas Negeri Sebelas Maret, Surakarta, 24-26 October 2013, pp. G201-G211,
- Puri, A., Hardiyatmo, H.C., Suhendro, B., dan Rifa'i, A., 2013d, Behavior of Fullscale nailed-slab System with Variation on Load Positions, *1st International Conference on Development Infrastucture (ICID)*, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Solo, 1-3 November 2013, pp. 26-36.
- Puri, A., Hardiyatmo, H.C., Suhendro, B., dan Rifa'i, A., 2014, Behavior of Nailed-slab System on Soft Clay Due to Repetitive Loadings by Conducting Full Scale Test, *Proc. 17th Intrntl. Symp. FSTPT*, University of Jember, pp. 739-750.
- Gue, S. S., dan Tan, Y-C., 2005, Innovative Substructures on Soft Ground, *Master Builders Journal*, 2nd Quarter 2005, akses dari www.google.com; [www.mbam.org.my/mbam/images/MBJ2Q05pdf/CsSUBSTRUCTURE\(8-14\).pdf](http://www.mbam.org.my/mbam/images/MBJ2Q05pdf/CsSUBSTRUCTURE(8-14).pdf).
- Simanjuntak, J.S., Wicaksono, S., Nurjaman, H.N., Karminto, Jayaputra, A.A., Rahadian, E., dan Shouman, M., 2003, Konsep "Closed to End Bearing" pada Perencanaan Sistem Cerucuk Matras beton untuk Proyek Peningkatan Jalan Tol Prof. Sedyatmo, *Prosiding KOGEI VI & PIT VII HATTI*, Jakarta, pp. 187-193.
- Suhendro, B., 2000, *Metode Elemen Hingga dan Aplikasinya*, Jurusan Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.
- Suhendro, B., 2006, *Sistem Cakar Ayam Modifikasi sebagai Alternatif Solusi Konstruksi Jalan di Atas Tanah Lunak*, Saduran dari Buku 60 Tahun Republik Indonesia, Jakarta, Indonesia.
- 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, 31 Maret 2010.
- Taa, P.D.S., 2010, Pengaruh Pemasangan Kelompok Tiang Terhadap Kenaikan Pelat dalam Sistem Nailed-Slab yang Terletak di Atas Tanah Dasar Ekspansif, *Tesis*, Program Studi Teknik Sipil, Program Pascasarjana UGM, Yogyakarta, Indonesia.
- Wahyudi, H., Arif, M., dan Ryantori, 2010, Swelling Soil dan Perkerasan Jalan Konstruksi Sarang Laba-laba, *Prosiding Seminar dan Pameran Sehari 2010 Inovasi Baru Teknologi Jalan dan Jembatan*, DPD HPJI Jatim, Surabaya, 31 Maret 2010.
- Wong, S.C. dan Poulos, H.G., 2001, Performance of Various Piled-embankment System, *Proceeding 5th International Coneference on Deep Foundation Practice incorporating Piletalk*, Siangapore, 4-6 April 2001, pp. 395-402.

CURRICULUM VITAE



IDENTITAS DIRI

Nama Lengkap	Dr. Anas Puri, S.T., M.T.
Tempat dan Tanggal Lahir	Pekanbaru, 5 Mei 1970
Pekerjaan	Dosen
Jabatan Fungsional	Lektor Kepala
NIK	090602239
Lembaga/ Unit Kerja	Universitas Islam Riau/ Fakultas Teknik
Alamat Kantor	Fakultas Teknik Universitas Islam Riau, Jl. Kaharuddin Nasution 113 Pekanbaru
Alamat Rumah	Perum Yepupa Utama Permai Blok A7 Jl. As Salam Utama, Kel. Simpang Tiga, Pekanbaru
Alamat e-mail	anaspuri@yahoo.com; anaspuri@eng.uir.ac.id

RIWAYAT PENDIDIKAN

- 2009 – 2015 Doktor Teknik Sipil, Pascasarjana Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Okt-Des 2012 Special Research Student in Post Graduate Program, Kyushu University.
- 2000 – 2003 Magister Teknik, Pascasarjana Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- 1990 – 1996 Sarjana Teknik, Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Riau, Pekanbaru.

PENULISAN ILMIAH

- 2014 Behavior of Nailed-slab System on Soft Clay Due to Repetitive Loadings by Conducting Full Scale Test, *IJCEE-IJENS*, Vol. 14 No. 06, pp. 24-30. (terpilih untuk publikasi internasional dari Proc. 17th FSTPT Intrntl. Symp. pp. 739-750).

- 2014 Prospek Aplikasi Perkerasan Sistem Pelat Terpaku untuk Jalan pada Tanah Lunak, *Seminar Triwulan Teknik Sipil*, PPs. Univ. Islam Riau, Edisi #1, pp. 1-15.
- 2013 Behaviour of Fullscale Nailed-slab System with Variation on Load Positions, *Proc. 1st Intl. Conf. on Infra-structure Development (ICID)*, pp. 26-36.
- 2013 Penerapan Metode Analisis Lendutan Pelat Terpaku Model Skala Penuh dan Komparasi dengan Uji Pembebanan, *Prosiding Konferensi Teknik Sipil (KonTekS) ke-7*, 24-25 Oktober 2013, pp. G201-G211.
- 2013 Deflection Analysis of Nailed-Slab System which Reinforced by Vertical Wall Barrier Under Repetitive Loadings, *Proc. The 6th CECAR 2013*, Jakarta, 20-22 August 2013, pp. TS6-10—TS6-11.
- 2013 Pile Spacing and Length Effects Due to the Additional Modulus of Subgrade Reaction for the Nailed-slab System Resting on Soft Clay, *Proc. of 13th Symposium on QiR 2013*, Yogyakarta, 25-28 June, pp. 1032-1310.
- 2012 Application of the Additional Modulus of Subgrade Reaction to Predict the Deflection of Nailed-slab System Resting on Soft Clay Due to Repetitive Loadings, *Proc. of 16th Annual Scientific Meeting*, HATTI, pp. 217-222.
- 2012 Determining Additional Modulus of Subgrade Reaction Based on Tolerable Settlement for the Nailed-slab System Resting on Soft Clay, *IJCEE-IJENS*, Vol. 12 No. 03, 32-40.
- 2011 Kontribusi Koperan dalam Mereduksi Lendutan Sistem Pelat Terpaku pada Lempung Lunak, *Prodising KOGEI IX dan PIT XV HATTI*, 7-8 Desember, pp. 299-306.
- 2011 Studi Eksperimental Lendutan Pelat yang Diperkuat Tiang-tiang Friksi Pendek pada Lempung Lunak, *Prosiding PIT XIV HATTI*, 10-11 Februari, pp. 317-321.
- 2008 Prediction of the Apparent Friction Coefficient on the Soil-Geotextile Interface Based on Empirical Data, *j. Sainis*, Vol. 10 No.1, pp.46-51.
- 2005 Aplikasi Model Hiperbolik Pada Pasir Bergradasi Seragam di Bawah Beban Aksi-simetri, *j. Sainis*, Vol. 8 No. 1, pp. 1-10.

Lampiran

Lampiran 1: Panjang tiang perlu berdasarkan luas bidang kontak struktur dan tanah pada Cakar Ayam Modifikasi (CAM) Waru

Lampiran 2: Hasil analisis lendutan Pelat Terpaku dengan 4 x 4 tiang untuk beban sentris pelat

Lampiran 3: Hasil analisis lendutan Pelat Terpaku dengan 4 x 4 tiang untuk beban di pinggir pelat

Lampiran 4: Kontrak penelitian

Lampiran 1

CAM Waru

Pelat:	Lebar =	5 m	
	Panjang =	5 m	
CAM:	tebal =	1.4 mm	
	dia. =	0.8 m	
	tinggi =	1 m	(tinggi total hingga pelat 1,2 m).
	keliling =	2.512 m	
	Jumlah =	4 buah	

Luas bidang kontak (m²):

Pelat:	CAM:	
25	20.096	karena tebal cakar sangat tipis, maka pengaruhnya diabaikan.

$$R_{inter} = 0.5 \text{ (antara tanah lunak dan baja).}$$

Nailed-slab

Pelat:	Lebar =	5 m	
	Panjang =	5 m	
Tiang:	dia. =	0.2 m	
	tinggi =	??	
	keliling =	0.628 m	
	luas tampang =	0.0314 m ²	
	Jumlah =	??	buah

$$R_{inter} = 0.8 \text{ (antara tanah lunak dan beton).}$$

Jika R interface diperhitungkan, dan menganggap luas bidang kontak tiang pada nailed slab setara bidang kontak cakar, maka panjang total tiang perlu = 20.00 m

Jika jumlah tiang	maka panjang satu tiang (m)
4	5.00
9	2.22
16	1.25
25	0.80

Dicoba variasi sebagai berikut:

Jika jumlah tiang	maka panjang satu tiang (m)	Jarak tiang, s (m)
9	2.00	1.75
16	1.00	1.25

Kontribusi cakar dan tiang terhadap kekakuan pelat diabaikan.

Lampiran 2

Nailed-slab Beban Sentris

Lendutan (mm)

tanpa berat sendiri

Pengaruh panjang tiang

Jarak tiang, $s = 1,25$ m.

$s/d = 6.25$

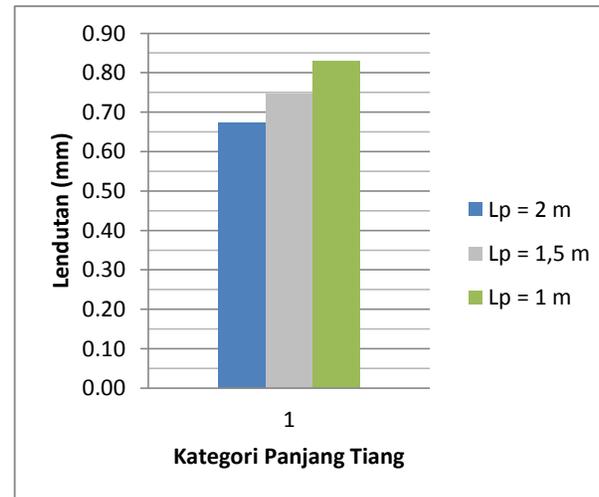
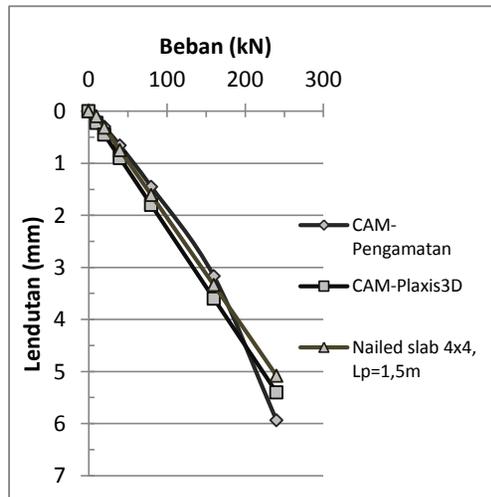
Beban (kN)	Nailed Slab, 4 x 4			CAM Waru		Beda thd pengamatan CAM		
	Lp = 2 m	Lp = 1,5 m	Lp = 1 m	Plaxis 3D	Pengamatan	Lp = 2 m	Lp = 1,5 m	Lp = 1 m
0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0.06	0.10	0.14	0.23	0.15	-62.01	-34.88	-3.63
20	0.26	0.31	0.37	0.45	0.30	-12.54	4.70	24.20
40	0.67	0.75	0.83	0.90	0.66	2.00	13.17	25.55
80	1.49	1.61	1.74	1.80	1.45	2.76	11.03	20.00
160	3.14	3.34	3.57	3.60	3.17	-0.95	5.36	12.62
240	4.79	5.08	5.40	5.40	5.94	-19.36	-14.48	-9.09

Nailed Slab, 4 x 4

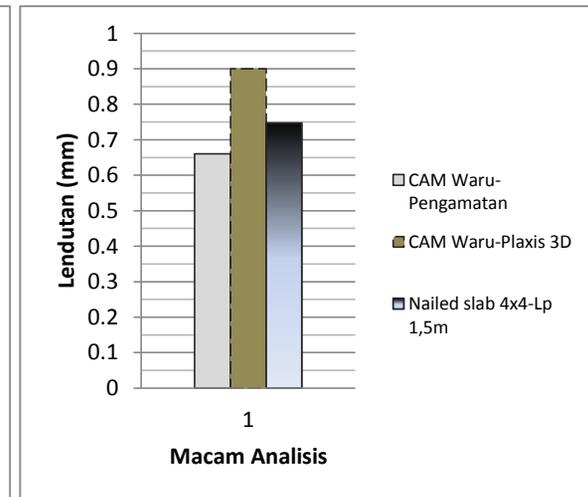
Pada beban $Q = 40$ kN

Dia. Tiang, $d = 0.2$ m

Beban (kN)	Panjang tiang, Lp (m)		
	2	1.5	1
Lp/d	10	7.5	5
Lendutan (mm)	0.67	0.75	0.83



$Q = 40$ kN



$Q = 40$ kN

Nailed-slab Beban di Pinggir

Lendutan (mm) tanpa berat sendiri

Pengaruh panjang tiang

s/d = 6.25

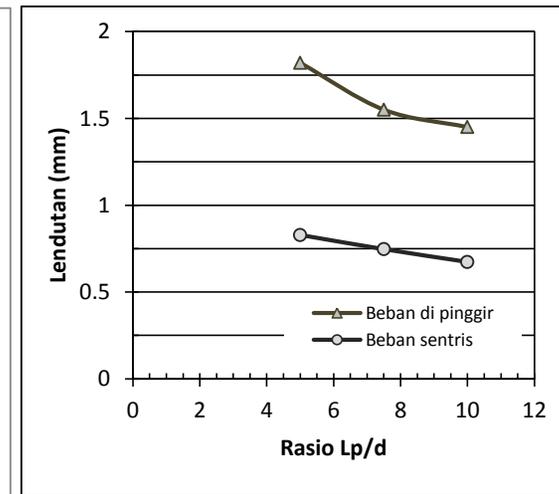
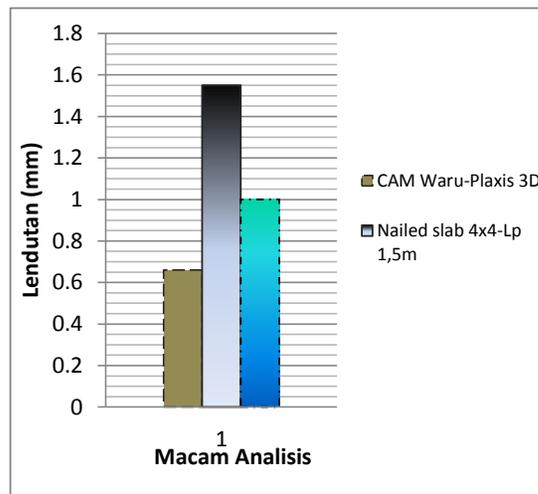
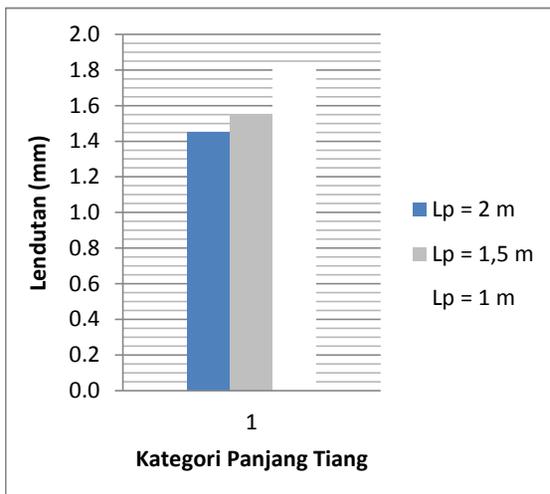
Beban (kN)	Nailed Slab, 4 x 4			CAM Waru		Beda thd pengamatan CAM		
	Lp = 2 m	Lp = 1,5 m	Lp = 1 m	Plaxis 3D	Pengamatan	Lp = 2 m	Lp = 1,5 m	Lp = 1 m
0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	1.45	1.55	1.82	1.82	0.66	119.70	134.85	175.76
80	3.03	3.20	3.66	3.66	1.45			

Nailed Slab, 4 x 4

Pada beban Q = 40 kN

Dia. Tiang, d = 0.2 m

Beban (kN)	Panjang tiang, Lp (m)		
	2	1.5	1
Lp/d	10	7.5	5
Lendutan (mm)	1.45	1.55	1.82



Nailed slab 4x4, beban pinggir di antara dua baris tiang karenanya lendutan sedikit lebih tinggi dibanding nailed slab 3x3. Tiang yang terlalu pendek perlu jarak yang rapat maka tidak efektif dalam pelaksanaan. Tiang akan terpancang tidak kokoh karena kurangnya jepitan tanah.