

**LAPORAN KEMAJUAN
HIBAH DISERTASI DOKTOR**



**UJI MODEL SKALA KECIL DAN
ANALISIS ELEMEN HINGGA PERKERASAN
SISTEM PELAT TERPAKU PADA TANAH DASAR EKSPANSIF**

**WILLIS DIANA
NIDN :0522087401**

**DIBIYAI DENGAN
DIPA DIREKTORAT RISET DAN PENGABDIAN MASYARAKAT
KEMENTERIAN RISET TEKNOLOGI PENDIDIKAN
NOMOR : DIPA-042.06-0.1.401516/2016 TERTANGGAL 7 DESEMBER 2015**

**UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH YOGYAKARTA
SEPTEMBER 2016**

HALAMAN PENGESAHAN

Judul : Uji model Skala Kecil dan Analisis Elemen Hingga Perkerasan Sistem Pelat Terpaku Pada Tanah Dasar Ekspansif

Peneliti/Pelaksana
Nama Lengkap : Willis Diana
NIDN : 0522087401
Jabatan Fungsional : Asisten Ahli
Program Studi : Teknik Sipil
No. HP : 081392395338
Alamat surel : willisdiana80@yahoo.com ,
willis.diana@umy.ac.id

Anggota (1) :
Nama Lengkap :
NIDN :
Perguruan tinggi :
Anggota (2) :
Nama Lengkap :
NIDN :
Perguruan tinggi :
Nama Institusi mitra :
Alamat : Godegan RT06 RW 08 Godegan, Jamus
Kauman, Ngluwar, Magelang

Penanggung jawab : Willis Diana
Tahun Pelaksanaan : Tahun ke-1 dari rencana 1 tahun
Biaya Tahun berjalan : 43.500.000
Biaya Keseluruhan : 43.500.000
Mahasiswa yang terlibat S1= 0 Mahasiswa
S2= 0 Mahasiswa
S3= 0 Mahasiswa

Mengetahui,
Ketua LP3M UMY



(Hilman Latief, MA., PhD)
NIK: 1975091220004133033

Yogyakarta, 6 September 2016
Ketua Peneliti

(Willis Diana)
NIK: 197408222000123046

DAFTAR ISI

BAB 1. PENDAHULUAN

BAB II. TINJAUAN PUSTAK

A. Tanah Ekspansif dan Permasalahannya.....	4
B. Perkerasan Jalan Raya dan Sistem Pelat Terpaku	8
C. <i>State of the Art</i>	10
1. Tiang pada Tanah Ekspansif.....	10
2. Formulasi Elemen Hingga untuk Tanah Ekspansif.....	13

BAB III TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

A. Tujuan Penelitian	16
B. Manfaat Penelitian	16

BAB IV METODE PENELITIAN

A. Bahan	18
B. Alat	18
C. Macam Pengujian	18
1. Pengujian Pendahuluan.....	18
2. Pengujian Utama.....	19
3. Simulasi Numeris.....	19
D. Tahapan Pengujian	20

BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Uji Pendahuluan	21
B. Hasil Uji Utama	21
1. Hasil Pengamatan <i>Displacement</i> Vertikal Akibat Pengembangan Tanah Pada Pengujian Model I.....	21
2. Hasil Pengamatan <i>Displacement</i> Vertikal Akibat Pengembangan Tanah Pada Pengujian model II.....	27
3. Hasil Uji Pembebanan Model Pelat Terpaku Model I.....	35
4. Hasil Uji Pembebanan Model Pelat Terpaku Model II.....	37
5. Hasil Uji Pembebanan Model Pelat dengan Tiang Tunggal Pengujian Model I.....	38
6. Hasil Uji Pembebanan Model Pelat dengan Tiang Tunggal Pengujian Model II.....	44
7. <i>California Bearing Ratio</i> (CBR) Sebelum dan Setelah Pengembangan.....	46

8.	Profil Kadar Air Sebelum dan Sesudah Pengembangan Pada Pengujian Model I.....	47
9.	Profil Kadar Air Sebelum dan Sesudah Pengembangan Pada Pengujian Model II.....	49
C.	Analisis Numeris dengan Plaxis 2 Dimensi.....	50
1.	Simulasi Numeris untuk Pelat dengan Tiang Tunggal.....	50
2.	Simulasi Numeris untuk Pelat dengan Kelompok Tiang.....	54

BAB VI RENCANA TAHAPAN BERIKUTNYA

BAB VII KESIMPULAN DAN SARAN

A.	Kesimpulan	66
B.	Saran	67

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Tipikal sistem pelat terpaku (Hardiyatmo, 2011)	3
Gambar 2.1. Ilustrasi konsep tahapan proses pengembangan crystalline untuk smectite (Likos, 2004).....	5
Gambar 2.2. Ilustrasi Kondisi <i>Edge Heave</i> dan <i>Center Heave</i> (Reed & Kelley, 2000).....	6
Gambar 2.3. Ilustrasi Pengaruh Pemasangan Tiang Pada Sistem Pelat Terpaku (Hardiyatmo, 2008)	10
Gambar 4.1. Bagan Alir Penelitian	20
Gambar 5.2. Pengaruh panjang tiang terhadap <i>displacement</i> pada sistem pelat terpaku akibat pembasahan tanah ($w_o=11,21\%$ dan $w_f=47,42\%$).....	22
Gambar 5.3. Pengaruh spasi tiang terhadap <i>displacement</i> pada sistem pelat terpaku akibat pembasahan tanah ($w_o=11,21\%$ dan $w_f=47,42\%$).	23
Gambar 5.4. Perbandingan kenaikan permukaan pelat perhari berukuran 10 cm x 10 cm tanpa tiang dan dengan tiang panjang 15 cm, 20 cm dan 25 cm akibat pembasahan ($w_o=11,21\%$ dan $w_f=47,42\%$).....	24
Gambar 5.5. Perbandingan kenaikan permukaan pelat perhari berukuran 15 cm x 15 cm tanpa tiang dan dengan tiang panjang 15 cm, 20 cm dan 25 cm akibat pembasahan ($w_o=11,21\%$ dan $w_f=47,42\%$).....	24
Gambar 5.6. Perbandingan kenaikan tiang (tanpa pelat) akibat pembasahan ($w_o=11,21\%$ dan $w_f=47,42\%$)	25
Gambar 5.7. Perbandingan <i>heave</i> tanah, <i>displacement</i> vertikal pelat saja dengan ukuran 10 cm x 10 cm dan pelat 15 cm x 15 cm akibat pembasahan ($w_o=11,21\%$ dan $w_f=47,42\%$).....	26
Gambar 5.8. Distribusi <i>heave</i> tanah sepanjang kedalaman pada pengujian model I	27
Gambar 5.9. Model pelat pada pengujian model II.....	28
Gambar 5.10. Pengaruh kekuatan tiang pada pelat (bahan mortar semen) terhadap <i>displacement</i> akibat pembasahan tanah ($w_o=13,74\%$ dan $w_f=49,19\%$)	30
Gambar 5.11. Pengaruh kekuatan tiang pada pelat (bahan mortar semen) terhadap <i>displacement</i> akibat pembasahan tanah ($w_o=13,74\%$ dan $w_f=49,19\%$)	31

Gambar 5.12. Foto deformasi pelat (fleksiglass) akibat pembasahan tanah ($w_o=13,74\%$ dan $w_f=49,19\%$)	32
Gambar 5.13. Pengaruh penggunaan koperan terhadap <i>displacement</i> sistem pelat terpaku akibat pembasahan tanah ($w_o=13,74\%$ dan $w_f=49,19\%$)	33
Gambar 5.14. Kondisi tanah di bawah pelat setelah pembasahan	34
Gambar 5.15. <i>Displacement</i> yang terjadi pada model pelat mortar beton berukuran 10 cm x 10 cm dengan tiang tunggal $d=2$ cm, dan $L=20$ cm akibat pembasahan tanah ($w_o=13,74\%$ dan $w_f=49,19\%$)	34
Gambar 5.16. Distribusi <i>heave</i> sepanjang ketebalan tanah pada pengujian model II ($w_o=13,74\%$ dan $w_f=49,19\%$)	35
Gambar 5.17. Perilaku pelat terhadap pembebanan sebelum dan setelah pembasahan tanah ($w_o=13,74\%$ dan $w_f=49,19\%$)	36
Gambar 5.18. Defleksi akibat pembebanan pada model pelat sebelum dan sesudah pembasahan ($w_o=13,74\%$ dan $w_f=49,19\%$)	38
Gambar 5.19. Kurva tekanan-penurunan pada uji beban pelat 15 cm x 15 cm tanpa tiang dan dengan tiang tunggal sebelum pembasahan tanah dasar ($w_o=11,21\%$)	39
Gambar 5.20. Kurva tekanan-penurunan pada uji beban pelat 15 cm x 15 cm tanpa tiang dan dengan tiang tunggal setelah pembasahan tanah dasar ($w_f=47,42\%$)	39
Gambar 5.21. Pengaruh pemasangan tiang terhadap modulus reaksi subgrade (k') fungsi dari penurunan kondisi tanah sebelum dibasahi ($w_o=11,21\%$)	40
Gambar 5.22. Pengaruh pemasangan tiang terhadap modulus reaksi subgrade (k') fungsi dari penurunan kondisi tanah setelah dibasahi ($w_f=47,42\%$)	40
Gambar 5.23. Pengaruh pemasangan tiang terhadap modulus reaksi subgrade (k') fungsi dari tekanan, pada kondisi tanah sebelum dan setelah dibasahi ($w_o=11,21\%$ dan $w_f=47,42\%$)	41
Gambar 5.24. Rasio modulus reaksi tanah k_{ns}^d/k_s^d terhadap tekanan pada kondisi awal ($w_o=11,21\%$) dengan berbagai variasi panjang tiang	42
Gambar 5.25. Rasio modulus reaksi tanah k_{ns}^w/k_s^w terhadap tekanan setelah dibasahi ($w_f=47,42\%$) dengan berbagai variasi panjang tiang	42
Gambar 5.26. Rasio modulus reaksi tanah k_{ns}^d/k_{ns}^w terhadap tekanan setelah dibasahi dengan berbagai variasi panjang tiang ($w_o=11,21\%$ dan $w_f=47,42\%$)	43

Gambar 5.27. Perbandingan modulus reaksi subgrade terhadap variasi panjang tiang ($w_o=11,21\%$ dan $w_f=47,42\%$)	44
Gambar 5.28. Hubungan tekanan dan <i>displacement</i> pada uji pembebanan pada kondisi tanah sebelum dibasahi dan setelah dibasahi ($w_o=13,74\%$ dan $w_f=49,19\%$)	45
Gambar 5.29. Hubungan tekanan dan modulus reaksi subgrade pada pembebanan repetitif <i>loading-unloading</i> pada kondisi sebelum dibasahi	46
Gambar 5.30. Hasil uji CBR di tempat sebelum dan setelah pembasahan ($w_o=11,21\%$ dan $w_f=47,42\%$)	46
Gambar 5.31. Foto pengujian CBR sebelum pengembangan tanah.....	47
Gambar 5.32. Lokasi pengambilan sampel kadar air	48
Gambar 5.33. Profil kadar air terhadap kedalaman sebelum dan setelah pembasahan tanah ($w_o=11,21\%$ dan $w_f=47,42\%$).....	48
Gambar 5.34. Lokasi pengambilan sampel untuk kadar air pada pengujian model II	49
Gambar 5.35. Profil kadar air pada awal dan akhir pengujian model I	49
Gambar 5.36. Geometri model.....	52
Gambar 5.37. Variasi pengembangan tanah sepanjang kedalaman lapisan tanah ekspansif.....	52
Gambar 5.38. Perbandingan antara hasil pengujian dengan simulasi Plaxis	53
Gambar 5.39. <i>Displacement</i> pada pelat akibat pengembangan tanah pada berbagai variasi (L/H)	53
Gambar 5.40. Tegangan tanah yang terjadi terhadap perubahan <i>displacement</i> vertikal tanah pada titik A	54
Gambar 5.41. Tegangan tanah yang terjadi terhadap perubahan <i>displacement</i> vertikal tanah pada titik B	54
Gambar 5.42. Ilustrasi tampak atas model pengujian di laboratorium	55
Gambar 5.43. Deformasi pelat arah melintang	56
Gambar 5.44. Perbandingan deformasi pelat analisis numeris Plaxis dan hasil pengujian	57
Gambar 5.45. Deformasi sistem pelat terpaku arah melintang	58
Gambar 5.46. Perbandingan deformasi sistem pelat terpaku dari analisis numeris Plaxis dan hasil pengujian laboratorium	58
Gambar 5.47. Deformasi pelat arah memanjang.....	59
Gambar 5.48. Perbandingan deformasi pelat dan pelat dengan tiang, arah memanjang.....	59

Gambar 5.49. Deformasi pelat dengan tiang arah memanjang	60
Gambar 5.50. Perbandingan antara analisis Plaxis dengan hasil pengujian pada pelat dengan tiang panjang, $L=20$ cm, $s=10$ cm.....	61
Gambar 5.51. Perbandingan tegangan normal pada pelat dan pelat dengan tiang (sistem pelat terpaku)	62
Gambar 5.52. Perbandingan tegangan geser pada pelat dan pelat dengan tiang (sistem pelat terpaku)	62
Gambar 5.53. Perbandingan momen pada pelat dan pelat dengan tiang	62
Gambar 5.54. Tegangan-tegangan yang terjadi pada tiang no.1 akibat pengembangan tanah dasar	63
Gambar 5.55. Tegangan-tegangan yang terjadi pada tiang no.2 akibat pengembangan tanah dasar	63
Gambar 5.56. Tegangan-tegangan yang terjadi pada tiang no.3 akibat pengembangan tanah dasar	64
Gambar 5.57. Tegangan-tegangan yang terjadi pada tiang no.4 akibat pengembangan tanah dasar	64

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Judul Tabel dan Judul Gambar (Style Caption)	15
Tabel 5.1. Sifat-sifat tanah	21
Tabel 5.2. <i>Displacement</i> vertikal pelat sistem pelat terpaku.....	22
Tabel 5.3. <i>Displacement</i> vertikal pelat sistem pelat terpaku.....	26
Tabel 5.4. <i>Displacement</i> di bawah titik beban P=200 kg pada model pelat	36
Tabel 5.5. Modulus reaksi subgrade sebelum dan setelah pembasahan	43
Tabel 5.6. Hasil uji CBR.....	47
Tabel 5.7. Material untuk model Tanah dan Struktur (pelat dan tiang).....	51
Tabel 5.8. Material untuk model tanah dan struktur (pelat dan tiang) pemodelan <i>plane strain</i>	55

BAB 1

PENDAHULUAN

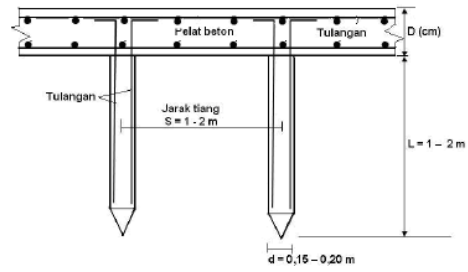
Sistem perkerasan harus mampu mendukung beban lalu lintas agar tanah dasar (subgrade) dan lapisan-lapisan pembentuk perkerasan tidak mengalami tegangan dan regangan yang berlebihan yang dapat menyebabkan deformasi yang besar pada struktur perkerasan. Tanah asli di alam banyak yang tidak mampu mendukung beban berulang dari lalu lintas, sehingga perlu teknologi perkerasan jalan yang secara struktur mampu mendukung beban, umur layanan yang cukup panjang, pemeliharaan yang minimal, dan pelaksanaan pengerjaan yang praktis. Permasalahan yang kerap terjadi pada struktur jalan di Indonesia adalah masalah jalan yang berada di atas tanah ekspansif. Tanah ekspansif adalah tanah yang mengalami perubahan volume jika kadar air berubah. Jika kadar air bertambah, tanah akan mengembang (*swell*), jika kadar air berkurang tanah akan menyusut (*shrinkage*). Kembang susut tanah yang tidak terkontrol dapat meningkatkan tegangan pada perkerasan akibat tidak meratanya dukungan, yang dapat mempercepat kerusakan, jalan bergelombang sehingga mengurangi fungsi layanan jalan dan berpengaruh terhadap aspek keselamatan pengguna jalan.

Alternatif penanganan struktur perkerasan pada tanah ekspansif yang biasanya dilakukan adalah dengan metode perbaikan tanah, manajemen air (drainasi), dan/atau membuat struktur yang relatif kaku yang mampu untuk melawan beda pergerakan dan tekanan pengembangan. Perkerasan kaku (*rigid pavement*) dapat langsung menumpu pada tanah dasar lunak dan/atau di atas lapis fondasi jalan. Namun perubahan volume (pengembangan dan penyusutan) tanah di bawahnya cenderung bersifat tidak seragam akibat ketidakhomogenan tanah. Selain menerima beban siklik oleh kendaraan, perkerasan juga menerima beban akibat temperatur yang membuat perkerasan mengalami momen lentur bolak-balik. Sifat beton yang memiliki elastisitas dan kekakuan yang lebih besar dibandingkan dengan tanah yang bersifat elastoplastik, menyebabkan *displacement* pada pelat perkerasan dan tanah pendukungnya tidak sama (pelat perkerasan masih dalam kondisi elastis, sedangkan tanah sudah bersifat plastis), sehingga akibat beban dinamis kendaraan terbentuk rongga-rongga dibawah permukaan perkerasan.

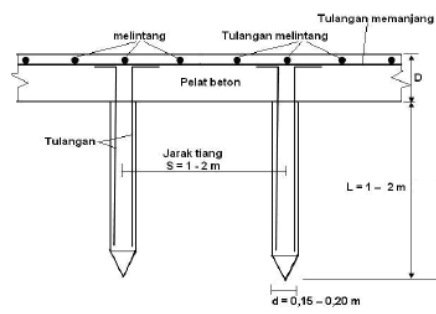
Hal-hal tersebut dapat mengakibatkan bergelombangnya jalan dan/atau patahnya struktur perkerasan. Hardiyatmo (2008) mengusulkan *Nailed Slab System* (sistem pelat terpaku), yaitu sistem perkerasan kaku (*rigid pavement*) yang terdiri dari pelat tipis (tebal 12 cm-20 cm) yang diperkuat dengan tiang-tiang mikro dengan diameter 15 cm-20 cm dan panjang berkisar 1,5 m - 2,0 m. Secara teoritis, tiang-tiang dan pelat beton dihubungkan secara monolit dengan bantuan tulangan-tulangan, sehingga membuat sistem ini lebih kaku. Menurut Hardiyatmo, (2011a), Puri, (2015) sistem pelat terpaku sangat cocok diaplikasikan untuk perkerasan jalan yang terletak pada tanah dasar yang tidak stabil (seperti tanah ekspansif). Tipikal prototipe sistem pelat terpaku seperti pada Gambar 1.1

Kombinasi sistem perkerasan kaku dengan perkuatan tiang-tiang (*nailed slab*) pada tanah ekspansif dimaksudkan untuk membuat sistem perkerasan lebih kaku, sistem lebih tahan terhadap gerakan naik turun tanah sehingga dapat mereduksi *differential heave* agar perkerasan tetap rata selama masa layanan, kontak antara pelat dengan tanah pendukung (ekspansif) tetap terbentuk (tidak terbentuk rongga antara struktur perkerasan dengan tanah dasar) sehingga beban akibat lalu lintas dan berat sendiri dapat tersalurkan merata ke tanah dasar, dan mengurangi tekanan pengembangan dengan adanya bagian dari tiang yang berfungsi sebagai anker (tiang yang berada dalam zona pasif) dan berat sendiri sistem pelat-tiang-tanah.

Aplikasi sistem pelat terpaku di lapangan belum pernah dilakukan, pengujian laboratorium sistem pelat terpaku pada tanah lempung lunak (lempung yang memiliki kapasitas dukung rendah, kompresibilitas tinggi) telah dilakukan dan menunjukkan kinerja yang baik (Puri, 2015). Pengaplikasian sistem pelat terpaku pada tanah ekspansif baru dalam tahap model teoritis, sehingga kehandalan sistem pelat terpaku sebagai alternatif sistem perkerasan kaku pada tanah dasar ekspansif perlu dilakukan pengujian model di laboratorium untuk mengetahui perilaku sistem pelat terpaku terhadap perubahan volume tanah akibat pembasahan pada tanah ekspansif.



a). Untuk tanah-dasar tidak stabil



b). Untuk tanah dasar stabil

Gambar 1.1. Tipikal sistem pelat terpaku (Hardiyatmo, 2011)

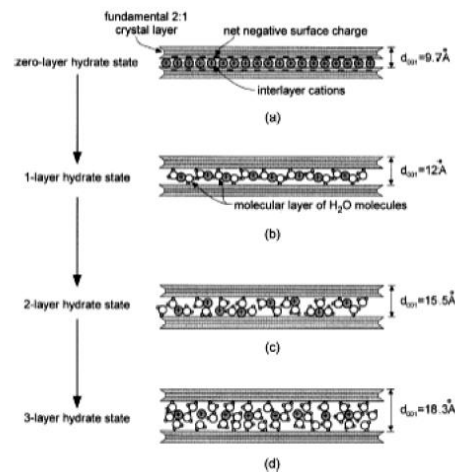
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Tanah Ekspansif dan Permasalahannya

Istilah material ekspansif digunakan untuk material yang menunjukkan perubahan volume dengan terserap atau keluarnya air dari massa tanah. Tanah lempung ekspansif (*expansive argillaceous soils*) atau tanah residual, adalah material yang telah berubah (mengalami pelapukan), yang terbentuk dari batuan atau sedimen. Mineral lempung yang mempunyai sifat ekspansif biasanya dari golongan mineral smectit (montmorillonite), vermiculite, chlorite, dan kombinasi campuran lapisan. Mekanisme pengembangan pada tanah lempung ekspansif sangat kompleks dan dipengaruhi oleh sejumlah faktor. Pengembangan terjadi karena perubahan sistem air yang mengganggu keseimbangan tegangan internal. Menurut Snethen, dkk., (1975) dan Wayllace, (2008), mekanisme perubahan volume skala mikro melibatkan empat dari 6 mekanisme yaitu; *osmotic repulsion*, tarikan partikel lempung, hidrasi kation, tarikan kapiler. Menurut Nelson, dkk, 2015, mekanisme pengembangan pada tanah ekspansif sebagai berikut, permukaan partikel lempung yang bermuatan negatif dan konsentrasi ion positif dalam larutan dekat partikel disebut *Diffuse double layer* (DDL). DDL yang bertumpuk antara partikel lempung memicu gaya tolak interpartikel atau secara skala makro disebut tekanan pengembangan. Interaksi DDL dan kemudian potensi pengembangan meningkat dengan meningkatnya ketebalan DDL. Ketebalan DDL dikontrol oleh banyak variabel termasuk konsentrasi dan valensi kation pada air tanah. Secara umum DDL lebih tebal dan pengembangan lebih besar berhubungan dengan konsentrasi kation yang rendah dan /atau adanya valensi yang lebih rendah. Ada dua jenis proses pengembangan pada sistem lempung ekspansif-air-ion, yaitu *crystalline swelling* dan *osmotic swelling*. *Crystalline swelling* terjadi pada kadar air yang relatif rendah (kurang dari ~20%) terutama terjadi akibat hidrasi pertukaran kation *interlayer*. Pengembangan terjadi karena air masuk ke *interlayer* mineral yang merupakan tahapan lapisan molekular, yang menghasilkan pemisahan *interlayer* sampai tiga atau empat lapisan air. *Osmotic swelling* terjadi pada kadar air yang lebih tinggi dan berhubungan dengan menerusnya pemisahan *interlayer* yang berkembang dari pergerakan air kedalam lapisan *interlayer* karena perbedaan

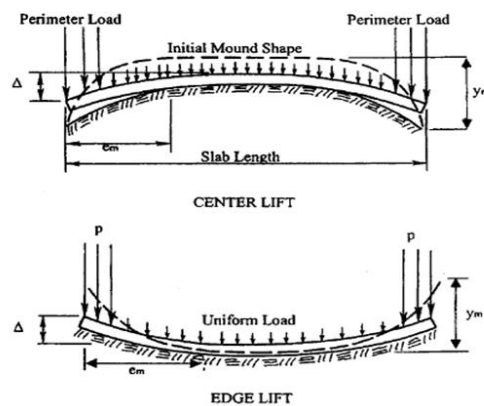
konsentrasi ion dalam *interlayer* dan dalam air pori. **Error! Reference source not found.** menunjukkan ilustrasi konseptual tahapan pengembangan *crystalline* untuk smectite (montmorillonite).



Gambar 2.1. Ilustrasi konsep tahapan proses pengembangan *crystalline* untuk smectite (Likos, 2004)

Pergerakan siklik (kembang susut) pada tanah dasar ekspansif akan menimbulkan masalah pada saat perencanaan maupun perilaku terutama pada pelat pada tanah ekspansif. Saat pelat dibangun di atas tanah ekspansif, pengaruh evaporasi dan presipitasi tanah pendukung di bawah pelat akan berubah. Kondisi iklim mempengaruhi sekeliling tanah dan menyebabkan *suction* atau distribusi kelembaban yang tidak seragam di bawah pelat. Sehingga, terjadi beda pergerakan tanah (penyusutan/pengembangan) terjadi antara tepi dan bagian tengah pelat. Beda pergerakan ini lebih berbahaya dibandingkan dengan total pergerakan pada tanah ekspansif yang biasanya menyebabkan kerusakan struktur. Perilaku pelat pada tanah ekspansif sangat tergantung pada variasi kondisi kelembaban pada tanah ekspansif. Bentuk permukaan tanah yang akan berkembang di bawah pelat tergantung pada *heave*, kekakuan tanah, kondisi kelembaban/kadar air, distribusi kelembaban, iklim, waktu yang dibutuhkan dari tahap pembangunan, beban struktur, kekakuan pelat, dan faktor lainnya. Ada dua pola *heave*, yaitu *center heave* dan *edge heave*, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.2. *Edge heave* terjadi ketika

bagian luar struktur terjadi peningkatan kadar air yang terjadi sebelum bagian dalam. *Center heave* terjadi karena peningkatan kadar air karena berkurangnya evapotranspirasi, peningkatan kadar air terbesar terjadi dekat dengan pusat struktur dan evapotranspirasi hilang sekeliling sudut yang menyebabkan *heave* lebih kecil pada daerah sisi-sisi. *Center heave* mewakili kondisi distorsi jangka panjang (Day, 1994).



Gambar 2.2. Ilustrasi Kondisi *Edge Heave* dan *Center Heave* (Reed & Kelley, 2000)

Dampak perubahan volume akibat mengembangnya tanah ekspansif semakin tampak pada struktur-stuktur yang berat sendirinya kecil, dan area cakupannya luas, seperti struktur perkerasan jalan. Kerusakan jalan yang diakibatkan oleh perilaku tanah ekspansif dapat dilihat dengan ciri-ciri seperti di bawah ini (Binamarga, 2005):

1. Retakan, retak pada perkerasan terjadi akibat penyusutan maupun pengembangan tanah. Retak ini merupakan retak memanjang yang dimulai dari tepi bahu jalan menuju ke tengah perkerasan. Lebar retakan bervariasi mulai dari retak rambut sampai retak berbentuk celah hingga mencapai 10 cm. Kedalaman retakan bervariasi mulai dari 1,0 cm sampai dengan kedalaman 50 cm. Retakan memanjang arah jalan disebabkan oleh retak yang terjadi pada tanah dasar, dan secara refleksi menjalar ke struktur perkerasan yang berada di atasnya dimulai dari samping perkerasan .

2. Pengangkatan tanah, pengangkatan tanah atau cembungan perkerasan jalan dapat diakibatkan oleh mengembangnya tanah ekspansif yang berada di bawah perkerasan. Cembungan ini dapat mempengaruhi struktur perkerasan sehingga menyebabkan permukaan jalan bergelombang. Pada saat-saat tertentu cembungan terjadi pada tepi perkerasan akibat pemompaan tanah dasar yang lunak oleh repetisi roda kendaraan.
3. Penurunan, penurunan permukaan perkerasan jalan dapat terjadi akibat berubahnya sifat tanah dasar menjadi tanah lunak atau terjadinya pengecilan volume akibat proses penyusutan. Penurunan permukaan yang terjadi dapat mencapai kedalaman 30 cm sehingga mengganggu kelancaran pengguna jalan.
4. Longsor, air permukaan yang berada di atas perkerasan dapat masuk ke dalam celah yang besar, sehingga tanah menjadi jenuh air dan kadar air di dalamnya meningkat. Dengan adanya peningkatan kadar air pada tanah ekspansif, maka kuat geser tanah semakin berkurang dan akan mencapai kuat geser kritisnya. Semakin berkurangnya kuat geser tanah akan berakibat semakin berkurang pula daya dukungnya, sehingga pada saat faktor keamanan mendekati satu, tanah dasar tidak mampu lagi menahan beban di atasnya dan longsor pun tidak dapat dihindari

Ruas jalan di pulau Jawa yang diketahui terletak di atas tanah ekspansif antara lain (Binamarga, 2005):

1. Ruas jalan tol Jakarta-Cikampek, Provinsi Jawa Barat,
2. Ruas jalan Jatibarang-Karangampel, Provinsi Jawa Barat,
3. Ruas jalan Semarang-Kudus, Provinsi Jawa Tengah,
4. Ruas jalan Semarang-Purwodadi, Provinsi Jawa Tengah,
5. Ruas jalan Wirosari-cepu, Provinsi Jawa Tengah,
6. Ruas jalan Yogyakarta-Wates, Provinsi DI Yogyakarta,
7. Ruas jalan Bojonegoro-Babat-Lamongan-Gresik-Surabaya, provinsi Jawa Timur,
8. Ruas jalan Ngawi-Caruban, Provinsi Jawa Timur.

B. Perkerasan Jalan Raya dan Sistem Pelat Terpaku

Perkerasan berfungsi untuk memberikan permukaan yang rata dan halus pada kendaraan, menyebarkan beban roda ke area permukaan tanah dasar (subgrade) yang lebih luas, sedemikian hingga tegangan yang terjadi pada tanah dasar dapat tereduksi, dan melindungi tanah dasar dari perubahan musim. Terdapat beberapa jenis perkerasan yaitu perkerasan fleksible (perkerasan aspal), perkerasan kaku (perkerasan dengan pelat beton), perkerasan campuran, dan jalan tanpa perkerasan. Pada tanah ekspansif, akibat perubahan musim, terjadi perubahan kadar air pada tanah, tanah dapat mengembang dan menyusut, terjadi perubahan kekuatan pada tanah, akibatnya struktur perkerasan berdeformasi. Hardiyatmo, (2008), mengusulkan sistem pelat terpaku (*Nailed Slab System*) sebagai perkerasan kaku jalan raya. Fungsi tiang-tiang dalam sistem pelat terpaku berguna untuk (Hardiyatmo, 2011) ,

1. Meningkatkan daya dukung tanah dasar (meningkatkan koefisien reaksi subgrade), dengan adanya kenaikan kapasitas dukung tanah dasar akibat dukungan tiang-tiang pada pelat akan mengurangi kebutuhan tebal perkerasan beton dan memperkaku sistem perkerasan.
2. Menjaga agar pelat beton tetap kontak dengan baik dengan lapis pondasi bawah dan/atau tanah dasar dibawahnya, sehingga timbulnya rongga-rongga di bawah pelat beton yang mengurangi kekuatan struktur perkerasan dapat dicegah, kekuatan jangka panjang struktur perkerasan lebih terjamin
3. Gerakan tanah dasar disekitar tiang-tiang akibat penurunan tidak seragam (*differensial settlement*) akan mendapat perlawanan gesek tiang, sehingga beda penurunan akan menjadi kecil, atau ketidakrataan pelat akan terkendalikan.

Prototipe sistem pelat terpaku seperti **Error! Reference source not found.**1. kelebihan sistem pelat terpaku dibandingkan dengan sistem perkerasan kaku atau fleksibel adalah (Hardiyatmo, 2011),

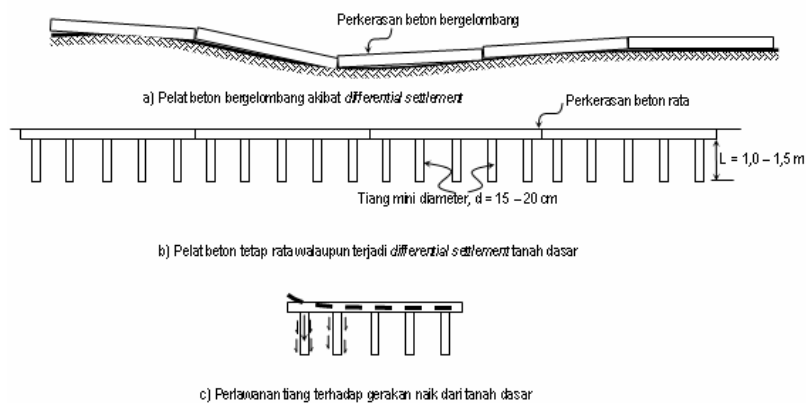
1. Sistem pelat terpaku adalah perkerasan yang memberikan kekakuan tinggi, sehingga tahan terhadap deformasi tanah dasar (penurunan tidak seragam dan getaran akibat kendaraan)
2. Sistem Pelat Terpaku mampu mendukung lalu lintas berat dan volume tinggi. Perancangan dapat didasarkan pada beban kendaraan maksimum yang diinginkan yang melebihi beban gandar standar untuk kekuatan konvensional.
3. Karena tiang-tiang selalu menjaga agar pelat beton tetap dalam kontak yang baik dengan material dibawahnya, maka umur perkerasan menjadi lebih panjang.
4. Pemeliharaan sangat kecil, sehingga mengurangi kebutuhan biaya pemeliharaan dikemudian hari.
5. Sistem pelat terpaku dibangun tanpa sambungan-sambungan akan mengurangi biaya pemeliharaan pada sambungan. Selain itu, penetrasi air masuk dalam lapis pondasi maupun tanah dasar kecil, karena tidak ada sambungan melintang, dan retak yang terjadi selalu tertutup rapat oleh adanya tulangan memanjang dan melintang.
6. Walaupun biaya awal lebih tinggi dari perkerasan beton maupun aspal sistem konvensional, namun biaya total selama masa pelayanan lebih rendah.
7. Tidak memerlukan agregat batuan untuk lapis pondasi atau lapis pondasi bawah, karena dibawah pelat hanya memerlukan lantai kerja dan sirtu
8. Dapat menyelesaikan masalah perkerasan jalan di atas tanah dasar ekspansif.

Sedang kelemahan dari Sistem Pelat Terpaku adalah,

1. Biaya investasi awal lebih tinggi,
2. Pembangunan memerlukan waktu relatif lebih lama.

Perkerasan kaku konvensional pada tanah lunak yang mempunyai kekakuan pelat yang cukup, masih dapat mengalami vibrasi yang besar yang mengakibatkan kontak pelat dan tanah menjadi lemah, sehingga terbentuk rongga antara pelat perkerasan dan tanah dasar. Kekuatan perkerasan pun akan turun seiring dengan waktu hingga perkerasan dapat mengalami kerusakan. Hal

yang berbeda pada Sistem Pelat Terpaku, vibrasi akan rendah karena adanya tahanan ankur yang diberikan tiang, tahanan ankur tiang dalam menahan beban merupakan kontribusi tahanan gesek dan tahanan cabut tiang-tiang, atau disertai dengan momen perlawanan. Ketika beban kendaraan bekerja, maka tiang-tiang memberikan perlawanan ke atas. Perlawanan lainnya yang diberikan tanah adalah tekanan kontak antara tanah dengan sisi bawah pelat. Tekanan kontak ini akan tetap termobilisasi mengingat sistem pelat terpaku ini diharapkan menciptakan kondisi dimana tidak terbentuk rongga antara pelat dan tanah. Tahanan ankur tiang meningkatkan kekakuan pelat perkerasan. Peningkatan kekakuan tersebut juga diperoleh karena adanya peningkatan tahanan lateral tanah di sekitar tiang sehingga tiang memberikan perlawanan momen. Gambar 2.3 menunjukkan pengaruh pemasangan sistem pelat terpaku pada tanah yang tidak stabil.



Gambar 2.3. Ilustrasi Pengaruh Pemasangan Tiang Pada Sistem Pelat Terpaku (Hardiyatmo, 2008)

C. State of the Art

1. Tiang pada Tanah Ekspansif

Pada tanah lempung lunak (*soft clay*) sistem pelat terpaku merupakan alternatif metode untuk meningkatkan kinerja perkerasan kaku, dan bukan metode perbaikan tanah (Puri, 2015). Tiang-tiang yang dipasang di bawah pelat berfungsi sebagai pengaku pelat, sehingga beban dapat disebar lebih luas ke tanah lunak,

tiang berfungsi sebagai angkur (Hardiyatmo, 2011, Puri, 2015) sehingga pelat tetap kontak dengan tanah dan *pumping* dapat dihindari dan biaya pemeliharaan menjadi minimal. Penggunaan struktur semacam tiang untuk mereduksi kenaikan (*heave*) pada tanah ekspansif juga dilakukan oleh Sharma & Phanikumar, (2005) dengan menggunakan *geopile*, Nusier & Alawaneh, (2004) menggunakan *micropile*.

Sorochan, (1991) melakukan pengujian lapangan pondasi tiang pada tanah ekspansif, hasilnya menunjukkan kapasitas dukung tiang berkurang karena pengembangan tanah. Pengembangan tanah menyebabkan gaya angkat ke atas yang melebihi tahanan permukaan lateral tiang. Kapasitas dukung tiang menurun setelah terjadinya pembasahan tanah yang disebabkan tanah ekspansif mengembang. Penurunan kapasitas dukung setelah pembasahan tergantung pada jenis tanah dan panjang tiang. Hal ini karena perbedaan kekuatan tanah sebelum dan setelah pembasahan, setelah pembasahan kekuatan tanah mengalami penurunan. Pada tanah ekspansif (sebelum pembasahan) 0.65-0.87 beban total didukung oleh tahanan selimut gesek tiang (lateral). Pada tanah yang mengembang, tahanan lateral yang mendukung sebesar 0.6-0.9 dari kapasitas dukung total. Tanah yang terletak dibawah zona tanah ekspansif (di bawah zona pembasahan) dimana pengurangan kekuatan tidak terjadi, tahanan gesek lateral per unit panjang tidak berubah, dan tahanan ujung tetap selama pembasahan (Sorochan, 1991). Penurunan kapasitas dukung tiang karena pengembangan tanah juga dilaporkan oleh Aljorany & Noori, (2013) .

Secara umum semakin panjang tiang, *displacement* (perpindahan) tiang ke atas (*heave* tiang) akibat mengembangnya tanah akan berkurang (Sorochan, 1991, Mohamedzein, 2006, Xiao dkk., 2011, Nelson dkk., 2012). Perpindahan tiang dipengaruhi oleh *heave* tanah pada seluruh ketebalannya. *Heave* yang terjadi pada tanah tidak seragam sepanjang kedalamannya. *Heave* terbesar terjadi pada bagian atas (permukaan tanah), dan berkurang terhadap kedalaman. Sehingga lapisan atas lebih besar kontribusinya dalam menarik tiang ke atas, dan bagian yang lebih dalam pengaruhnya terhadap perpindahan tiang lebih kecil. Sehingga bagian yang lebih bawah (dalam) tiang tertahan (*restraint*). Tahanan terhadap kenaikan ini

disebabkan karena pengaruh *heave* yang tidak seragam pada sepanjang kedalaman (Sorochan, 1991).

Menurut Xiao, dkk., (2011), tiang dengan diameter (d) kecil ($d \sim 0,04L$) efektif menurunkan *displacement* tiang ke atas. Tiang dengan diameter lebih dari $0,04L$ hanya memiliki pengaruh yang kecil untuk menahan *displacement* tiang terhadap pengaruh pengembangan tanah. Poulos & Davis, (1980) menunjukkan pengaruh diameter tiang tidak signifikan di atas nilai minimum tertentu. Untuk nilai L/d lebih besar dari 2 pengaruh L/d minimal. Pergerakan pada $L/d=10$ hanya 20% lebih besar dari $L/d=20$. Tiang dengan diameter kecil yang diletakkan sampai di bawah zona aktif dapat lebih efektif mereduksi *heave* seperti halnya *belled pier*. Diameter batas harus mempertimbangkan kemudahan dan kontrol kualitas.

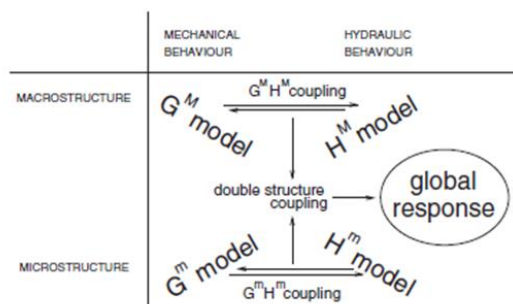
Tegangan tarik tiang bertambah dengan bertambahnya panjang tiang yang seluruhnya terpasang pada lapisan ekspansif (zona aktif) (Sorochan, 1991, Mohamedzein, 2006, Xiao, dkk., 2011, Zhang, dkk., 2009, Fan, dkk., 2007). Tegangan tarik maksimum terletak pada tengah-tengah panjang tiang untuk tiang tanpa beban eksternal, pada tiang dengan beban luar, tegangan tarik maksimum terletak pada $2/3$ panjang tiang yang berada dalam zona aktif (Mohamedzein, 2006).

Hasil simulasi numeris dengan metode elemen hingga yang dilakukan Nelson, dkk., (2012) untuk tiang pada tanah ekspansif menunjukkan bahwa sifat tanah dan *interface* mempengaruhi perilaku tiang, parameter yang mempengaruhi antara lain modulus elastisitas tanah (E), angka poisson tanah (ν) sudut gesek internal puncak dan residu (ϕ_p dan ϕ_r), kohesi, koefisien tekanan tanah lateral (K_o), koefisien friksi (α). Semakin besar modulus elastisitas (E) pada zona aktif, *heave* tiang (*displacement* ke atas tiang) semakin besar, dan beban tarik semakin besar. Angka poisson yang lebih besar pengaruhnya sedikit terhadap *heave* tiang dan beban tarik. Semakin besar koefisien tekanan lateral (K_o) *heave* yang terjadi pada tiang menurun. Jika friksi tiang (α) membesar akan sedikit mempengaruhi *heave* tiang, tetapi perhitungan gaya tarik yang berkembang pada tiang akan bertambah secara signifikan.

Kenaikan tiang (*heave* tiang) dapat dikurangi (diminimalkan) dengan memberikan beban luar (eksternal) pada kepala tiang (Mohamedzein, 2006, Xiao 2011, Nelson, dkk 2012). Menurut Sorochan, (1991), beban eksternal tidak dapat digunakan untuk menghilangkan *heave* tiang (hanya bisa untuk mereduksi *heave* tiang), karena untuk menghilangkan *heave* tiang dibutuhkan beban eksternal yang sama dengan beban angkat maksimum tiang, tetapi selama proses pembasahan terjadi penurunan kekuatan tanah disekitar tiang, jika beban eksternal melebihi kekuatan yang dapat didukung tanah maka yang akan terjadi adalah penurunan. Beban eksternal yang dapat diberikan untuk mereduksi *heave* tiang maksimal sebesar gaya angkat minimum tiang.

2. Formulasi Elemen Hingga untuk Tanah Ekspansif

Pemodelan perubahan volume dalam tanah ekspansif tidak jenuh berbeda dengan pemodelan *unsaturated* tanah lempung non ekspansif atau tanah lainnya. Prinsip pemodelan tanah ekspansif tidak jenuh melibatkan perilaku mikrostruktur dan makrostruktur dari tanah ekspansif. Prinsip pemodelannya seperti pada Gambar 2.4. Orang pertama yang mengembangkan model mekanik untuk lempung ekspansif adalah Gens & Alonso, (1992) dan Alonso et al., (1990) yang mengkombinasikan model untuk tanah tidak jenuh plastisitas rendah dengan model *reversible* untuk mikrostruktur yang dihubungkan dengan fungsi penghubung (*coupling function*) (Sun, et al., 2010). Alonso et al. (1990) mengusulkan model konstitutif elastoplastik untuk tanah tidak jenuh, modelnya dapat menggambarkan respon mekanik pada tanah tidak jenuh non ekspansif termasuk fenomena kegagalan (*collapse phenomenon*). Gens and Alonso, (1992) menyajikan kerangka pemodelan untuk menggambarkan perilaku mekanik dari tanah ekspansif tidak jenuh. Alonso, et. al., (1999) menyajikan *Barcelona Expansive Model* (BExM) dengan mempertimbangkan dua tingkat struktur (makrostruktur dan mikrostruktur).



Gambar 2.4. Skema pendekatan pemodelan untuk tanah ekspansif tidak jenuh (Masin, 2013)

Pemodelan dengan *double structure hydromechanical coupling* Gambar 2.4., dilakukan oleh Masin, (2013), Musso et al., (2013), Romero, (2013), dan Smith et al., (2009), Xie et al., (2007) Gens, dkk., (2006). Pada model BExM, parameter mikrostruktural dan fungsi *coupling* dari regangan mikrostruktural ke regangan makrostruktural sulit untuk ditentukan, terlebih model hanya bisa memprediksi kekuatan dan perilaku tegangan-regangan tanpa dihubungkan dengan perilaku *water retention*. Karena kerumitan untuk memperoleh parameter input, beberapa peneliti kemudian hanya meninjau dari perilaku makrostruktur saja, dengan melakukan analisis hidro-mekanik tanah tidak jenuh, seperti yang dilakukan Vu & Fredlund, (2006), Zhang & Briaud, (2006), Vanapalli & Adem, (2013), Long et al., (2006) dan Sun et al., (2010).

Briaud et al., (2012), mengembangkan model interaksi *weather-soil-structure* untuk pondasi *slab-on-grade* dengan dua metode perancangan, yaitu berdasarkan *suction (suction based design procedure)* dan berdasarkan kadar air (*water content based design procedure*). Abdelmalak, (2007) menggunakan Abaqus, untuk simulasi difusi *suction*, yang analog dengan fenomena difusi pada transfer panas. Untuk simulasi analisis difusi *suction* digunakan paket program yang tersedia pada Abaqus yaitu *thermal diffusion*. Untuk analisis *couple* dapat menggunakan analisis *couple thermal stress displacement* Abaqus, dapat pula digunakan analisis *uncouple thermal diffusion* dan *uncouple stress displacement*. Simulasi menggunakan 2D *plain strain*, dan menggunakan elemen Abaqus CPE4T “*Continuum Plain Strain 4-nodes Temperature*”. Zhang, (2004) berhasil menggunakan simulasi teknik *coupled suction-diffusion-stress displacement*

analysis dengan menganalogikan *suction diffusion* dengan fenomena *thermal diffusion* pada transfer panas, menggunakan software Abaqus.

Bryant et al., (2010) menggunakan Plaxis untuk memodelkan interaksi antara tanah-struktur. Plaxis tidak dapat memperkirakan *heave*, agar variasi pergerakan *slab* dapat terlihat, digunakan simulasi *rebound* dari pelepasan beban (*unloading*). Pemodelan tanah menggunakan Mohr-Coulomb, dari hasil analisis didapat bahwa pergerakan tanah tidak sepenuhnya menyebabkan pergerakan *slab* (disalurkan menjadi pergerakan *slab*), pergerakan relatif slab berkurang disebabkan karena kekakuan slab. Tepi slab terangkat naik karena *rebound* tanah, anonim seperti pada terangkatnya pelat akibat *edge heave* tanah, *edge heave* tanah terjadi karena tanah dibagian tepi pelat lebih basah daripada tanah sekitarnya. Kaufmann et al., (2010) menyelidiki interaksi antara tiang dengan tanah mengembang (*swelling soil*) dengan memodelkan sebagai tanah kohesif yang mengalami pelepasan beban (*unloading*) menggunakan Plaxis. Penelitiannya juga menganalisis *heave* terhadap ketebalan penggalian tanah, tegangan geser pada *interface* dan gaya internal tiang.

Tabel 2.1 Judul Tabel dan Judul Gambar (Style Caption)

Tipe	Kedalaman
Longsoran permukaan (<i>surface slide</i>)	<1,5 m
Longsoran dangkal (<i>shallow slides</i>)	1,5 – 5,0 m
Longsoran dalam (<i>deep slides</i>)	5,0 – 20,0 m
Longsoran sangat dalam (<i>very deep slides</i>)	>20 m

BAB III

TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

A. Tujuan Penelitian

Pengujian model fisik dengan skala kecil (*small scale model*) perkerasan Sistem Pelat Terpaku pada tanah dasar ekspansif perlu dilakukan, dengan model skala kecil berbagai parameter penting yang berpengaruh dapat lebih divariasikan (seperti pengaruh panjang, diameter, dan spasi tiang). Karena luasnya penelitian disertasi ini, maka tujuan khusus yang ingin dicapai dalam proposal penelitian ini adalah:

1. Mengkaji perilaku sistem pelat terpaku pada tanah dasar ekspansif mengembang dan meninjau pengaruh parameter-parameter sebagai berikut,
 - a. Perilaku deformasi terhadap pengaruh panjang dan spasi tiang,
 - b. Perilaku deformasi tiang sepanjang waktu pembasahan (dari kondisi tanah tidak jenuh (*unsaturated*) ke kondisi tanah jenuh (*saturated*)).
2. Perilaku deformasi sistem pelat terpaku terhadap pembebanan pada tanah sebelum dibasahi (*unsaturated*) dan tanah setelah dibasahi (*saturated*).
3. Mensimulasikan perilaku sistem pelat terpaku menggunakan *software* seperti Abaqus atau Plaxis, sehingga perilaku deformasi sistem pelat terpaku hasil pengujian laboratorium dapat diverifikasi dan gaya-gaya dalam yang terjadi pada sistem pelat terpaku dapat diketahui.

B. Manfaat Penelitian

Jalan merupakan infrastruktur vital yang dapat mempercepat pertumbuhan ekonomi, mempercepat pergerakan orang, pendistribusian barang, dan berkembangnya suatu daerah. Struktur perkerasan jalan dibangun dia atas tanah

dasar (subgrade), namun tidak semua tanah asli di alam dalam kondisi mampu mendukung beban berulang dari lalu lintas kendaraan tanpa mengalami deformasi yang besar, karenanya dibutuhkan struktur yang mampu melindungi tanah dari beban roda kendaraan. Perkerasan dapat berfungsi dengan baik apabila perancangan dilakukan dengan baik dan seluruh komponen-komponen utama dalam sistem perkerasan berfungsi dengan baik. Inovasi teknologi struktur perkerasan jalan dan perbaikan kondisi tanah dasar (subgrade) mutlak diperlukan. Di Indonesia telah berkembang berbagai sistem perkerasan jalan karya anak negeri antara lain, cakar ayam, cakar ayam modifikasi, konstruksi sarang laba-laba, cerucuk matras beton, dsb, yang menjadi solusi atas permasalahan konstruksi jalan di Indonesia. Di bidang perbaikan tanah dasar (subgrade) juga telah berkembang teknik-teknik untuk meningkatkan kemampuan tanah dasar dalam mendukung beban, antara lain teknik stabilisasi baik kimia maupun mekanik, perkuatan tanah dengan bahan alami maupun sintetis (geosintetik), penataan sistem drainasi, dan sebagainya. Sistem Pelat Terpaku merupakan salah satu sistem perkerasan kaku yang masih baru dan belum diaplikasikan di lapangan. Sistem ini diharapkan dapat bekerja dengan baik pada tanah-tanah yang tidak stabil seperti tanah lempung lunak dan tanah ekspansif. Pengujian perilaku dan kehandalan sistem ini perlu diuji di laboratorium dan analisis numeris menggunakan *software* elemen hingga perlu dilakukan untuk membandingkan hasil pengujian (pengukuran) model laboratorium, sehingga dapat diusulkan metode perancangan sistem pelat terpaku agar dihasilkan struktur yang kuat, optimal, aman, dan konstruksinya mudah dilaksanakan.

BAB IV

METODE PENELITIAN

A. Bahan

Tanah lempung diambil dari desa Soko, Ngawi, Jawa Timur. Pasir dan kerikil dari kali krasak. Pelat dan tiang dari mortar semen yang diperkuat dengan kawat (diameter 3 mm), kawat anyaman (diameter kawat 2 mm jarak antar kawat 1 cm). Bahan untuk model pelat dipakai juga pelat pleksiglass, dengan ketebalan 5 mm.

B. Alat

Peralatan uji *soil properties* seperti, piknometer, hidrometer, set saringan, alat pengujian batas cair (casagrande), peralatan pengujian kadar air, peralatan pemadatan standard proctor, konsolidometer (oedometer), peralatan pengujian geser langsung, alat uji triaksial, *dial gauge*, *proving ring*, kaliper.

Pemodelan di lapangan dengan ukuran kolam uji berukuran 7,0 m x 3,5 m kedalaman 1 m, dilengkapi dengan balok pembebanan yang diangkurkan sampai kedalaman 7 m, gelagar pembebanan. Didalam kolam uji di buat lima macam model pelat, untuk menggambarkan kondisi perkerasan kaku jalan tanpa tiang dan dengan tiang dalam berbagai variasi. Pengukuran deformasi pelat akibat pengembangan menggunakan kaliper dan *dial gauge*.

C. Macam Pengujian

Macam pengujian secara garis besar sebagai berikut,

1. Pengujian Pendahuluan

Pengujian pendahuluan meliputi pengujian sifat fisi tanah, seperti specific gravity, atterberg limit, analisa ukuran butir, klasifikasi tanah, uji triaksial, dan uji pengembangan dengan oedometer. Karakteristik fisik tanah dan bahan tiang dan pelat di perlukan sebagai data masukan analisis numeris.

2. Pengujian Utama

Pengujian utama perilaku sistem pelat terpaku dengan pemodelan skala kecil (*small scale model*) pada kolam uji di laboratorium. Perbandingan antara prototipe dengan model adalah 1:10. Prototipe sistem pelat terpaku seperti pada gambar 1.1, jika diasumsikan lebar jalan 7 m, maka potongan melintang prototipe pelat sistem terpaku menjadi 70cm x 20 cm. Kolam uji berukuran 7 m x 3,50 m x 1 m. Ukuran model pelat yang digunakan adalah 250 cm x 70 cm x 2 cm, untuk menggambarkan jalan dengan lebar 70 cm, dengan arah memanjang jalan 250 cm dan tebal perkerasan 2 cm. Model tiang dengan diameter 20 cm, menjadi 2 cm, dan panjang tiang 150 cm sampai 200 cm, dimodelkan dengan variasi panjang tiang 15 cm, 20 cm, dan 25 cm. Secara geometri, antara geometri model dan geometri prototipe telah memenuhi perbandingan skala. Pada pemodelan geoteknik, pemodelan material tanah biasanya tidak dapat dibuat dengan aturan penskalaan, tanah yang digunakan adalah tanah asli, sehingga parameter seperti kekuatan geser, parameter deformasi, dan lainnya biasanya berdasarkan pengalaman empiris dan teori-teori yang telah ada. Pada penelitian ini, pemodelan yang dilakukan,

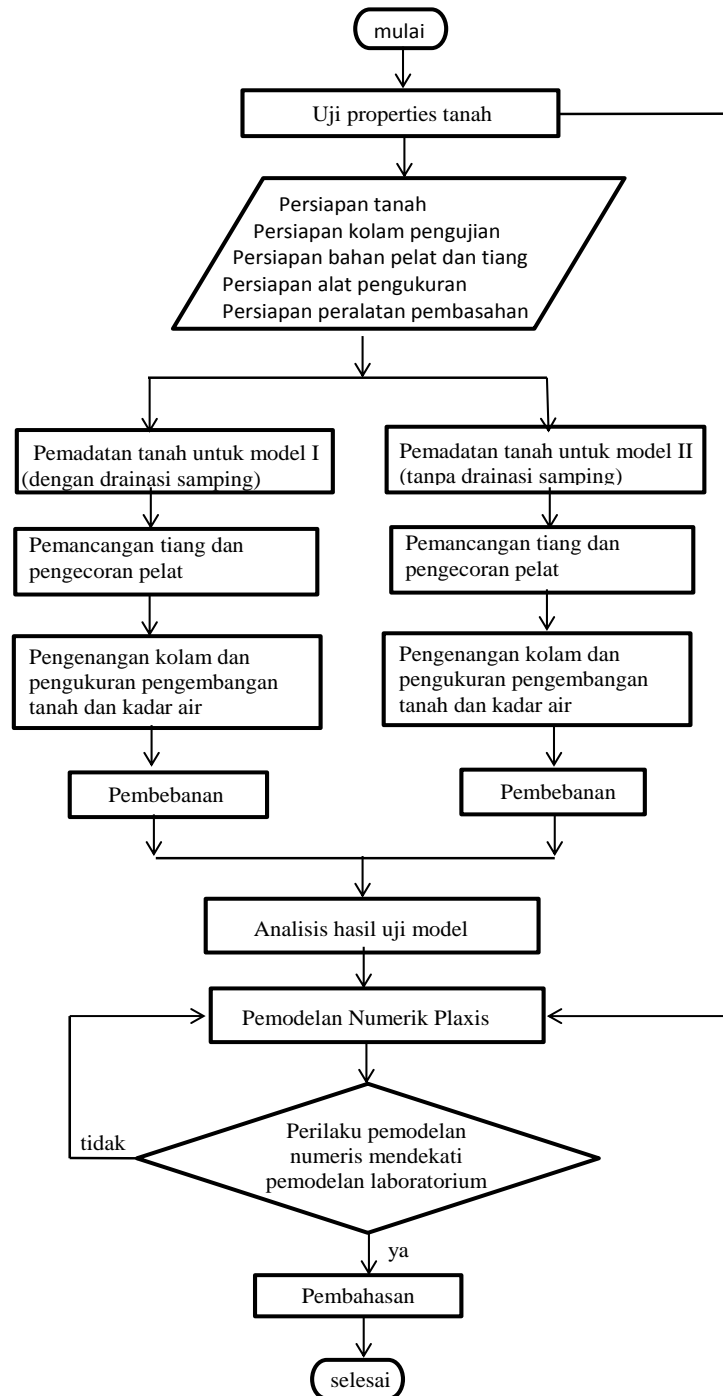
1. Model I, antara model pelat dibatasi dengan saluran drainasi berupa batu pecah, pada model ini, variasi yang dilakukan adalah terhadap panjang tiang, dan spasi antar tiang,
2. Model II, antara model pelat tidak di batasi oleh saluran drainasi, variasi model yang dilakukan adalah pengaruh kekakuan pelat, pengaruh pemasangan koperan.

3. Simulasi Numeris

Proses pengembangan pada tanah ekspansif analog dengan proses transfer panas. Sehingga pemodelan yang akan digunakan menggunakan analogi transfer panas yang biasa digunakan untuk menggambarkan pemuaihan material. Program yang dapat digunakan seperti Abaqus atau Plaxis. Analisis pelat terpaku terhadap pembebanan luar dilakukan dengan menggunakan simulasi numeris menggunakan Plaxis.

D. Tahapan Pengujian

Penelitian ini akan dilakukan dengan tahapan seperti yang ditunjukkan dalam bagan alir dalam Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Bagan Alir Penelitian

BAB V

HASIL YANG DI CAPAI

A. Hasil Uji Pendahuluan

Tabel 5.1 menampilkan hasil pengujian sifat-sifat tanah yang diperoleh dari uji pendahuluan.

Tabel 5.1. Sifat-sifat tanah

Sifat-sifat tanah	
<i>Specific gravity</i>	2.64
Batas cair (%)	94.39
Batas plastis (%)	34.58
Batas susut (%)	11.63
Indeks plastisitas (IP) (%)	59.81
Persen fraksi butiran lolos saringan no.200 (%)	96.32
Klasifikasi Unified	CH
Klasifikasi AASTHO	A-7-6
Berat volume kering maksimum (standar proktor) (kN/m ³)	12,5
Kadar air optimum (%)	35.55
Aktifitas	0.69
FSR	2
FSI	100

B. Hasil Uji Utama

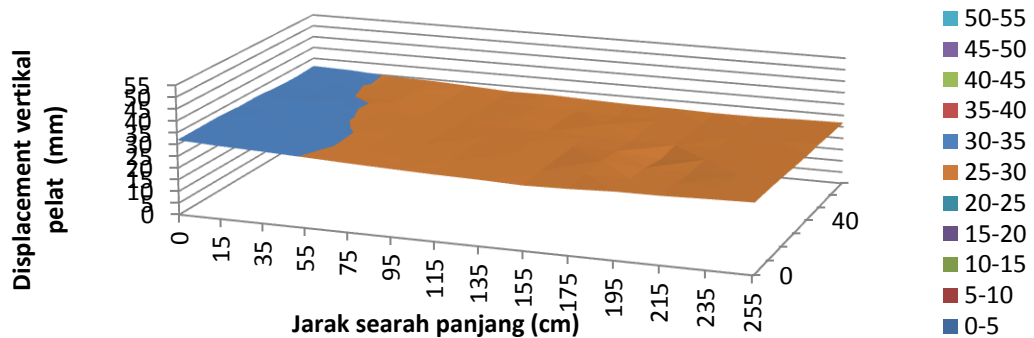
1. Hasil Pengamatan *Displacement* Vertikal Akibat Pengembangan Tanah Pada Pengujian Model I.

Pengujian utama berupa model pelat tanpa tiang dan pelat dengan tiang (*nailed slab system*) dengan perbandingan model: prototype, 1: 10. Pelat yang digunakan sebagai model berukuran 250 cm x 70 cm x 2 cm, dengan tiang diameter 2 cm, panjang 20 cm dan 25 cm. Pada pengujian model I, pelat dan tiang terbuat dari mortar semen, dengan perkuatan kawat galvanis pada tiang, dan *wiremesh* untuk tulangan pelatnya. Hubungan tiang dan pelat diusahakan monolit. Untuk memodelkan saluran drainasi kiri dan kanan model, pada sisi tepi model terdapat sekat drainasi dari batu pecah selebar 30 cm. Pembasahan pada tanah yang mendukung pelat dilakukan setiap hari, pada kolam pengujian berukuran 7

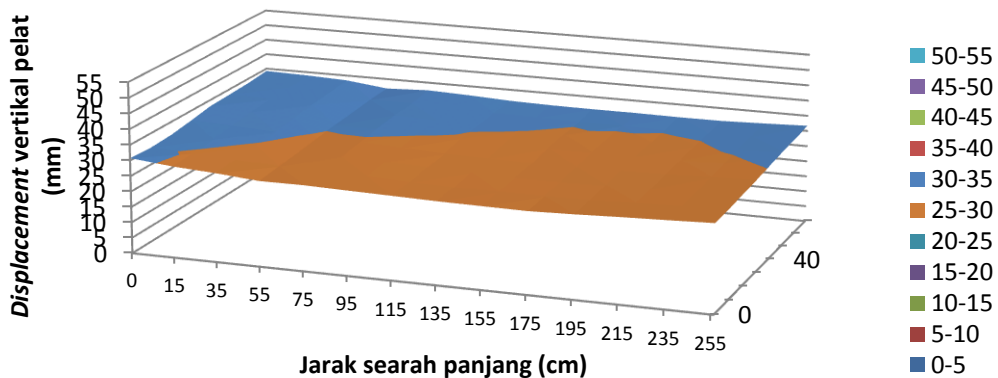
m x 3,5 m Gambar 5.1 dan pelat relatif lebih rata dibandingkan pelat tanpa perkuatan tiang. *Displacement* vertikal maksimum yang terjadi pada pelat tanpa perkuatan tiang sebesar 53,01 mm dan *displacement* terkecil sebesar 38,44 mm, sehingga terdapat beda *displacement* 18,93 mm sepanjang pelat, sedang beda *displacement* pada sistem pelat terpaku sebesar 6,51 mm. **Error! Reference source not found.** menunjukkan rekapitulasi *displacement* vertikal maksimum, minimum, dan beda *displacement* yang terjadi pada model.

Tabel 5.2. *Displacement* vertikal pelat sistem pelat terpaku

No.	Ukuran Pelat 250cm x 70cm x 2cm		<i>Displacement</i> Vertikal Pelat (mm)		Beda <i>Displacement</i> pelat (mm)
	Panjang tiang	Spasi tiang	Nilai terendah	Nilai tertinggi	
1.	0	0	34,88	53,01	18,93
2.	25	10	26,30	34,17	7,87
3.	20	15	27,20	35,39	8,19
4.	20	10	25,73	32,24	6,51



(a) Sistem Pelat Terpaku dengan tiang $d=2$ cm, $L=20$ cm, $s=10$ cm

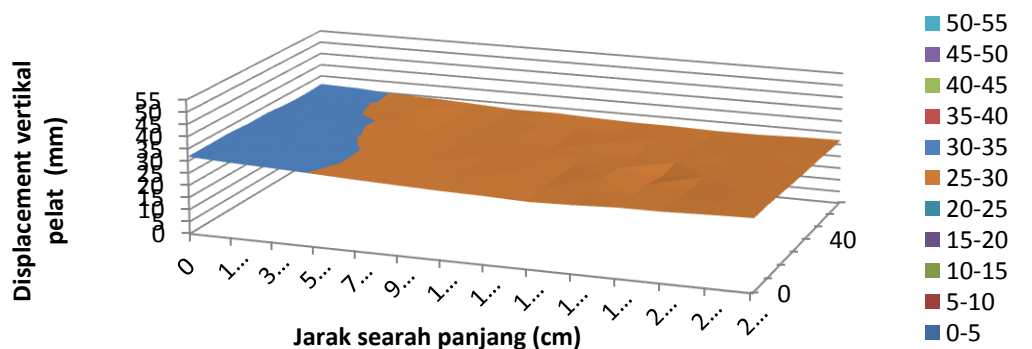


(b) Sistem Pelat Terpaku dengan tiang $d=2$ cm, $L=25$ cm, $s=10$ cm

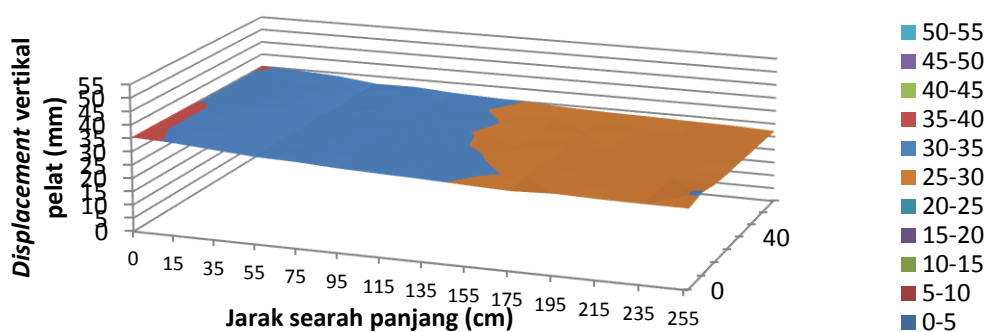
Gambar 5.2. Pengaruh panjang tiang terhadap *displacement* pada sistem pelat terpaku akibat pembasahan tanah ($w_o=11,21\%$ dan $w_f=47,42\%$)

Pengaruh panjang tiang terhadap *displacement* sistem pelat terpaku dengan variasi panjang tiang seperti di perlihatkan **Error! Reference source not found.**.. asil pengujian menunjukkan bahwa *displacement* yang terjadi akibat pembasahan antara pelat dengan perkuatan tiang dengan panjang $L=20$ cm dan $L=25$ cm tidak terlalu signifikan.

Gambar 5.3 menunjukkan perbandingan *displacement* vertikal akibat pembasahan pada sistem pelat terpaku dengan variasi spasi tiang. Dari Gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa *displacement* vertikal akibat pengembangan tanah dasar pada sistem pelat terpaku dengan spasi tiang 10 cm, lebih kecil dibandingkan dengan sistem pelat terpaku dengan spasi tiang 15 cm. Jumlah tiang menjadi lebih banyak pada model pelat dengan spasi tiang yang lebih kecil, menyebabkan sistem pelat menjadi lebih kaku dan berat sendiri sistem lebih besar. Hal ini yang melawan tekanan pengembangan tanah.



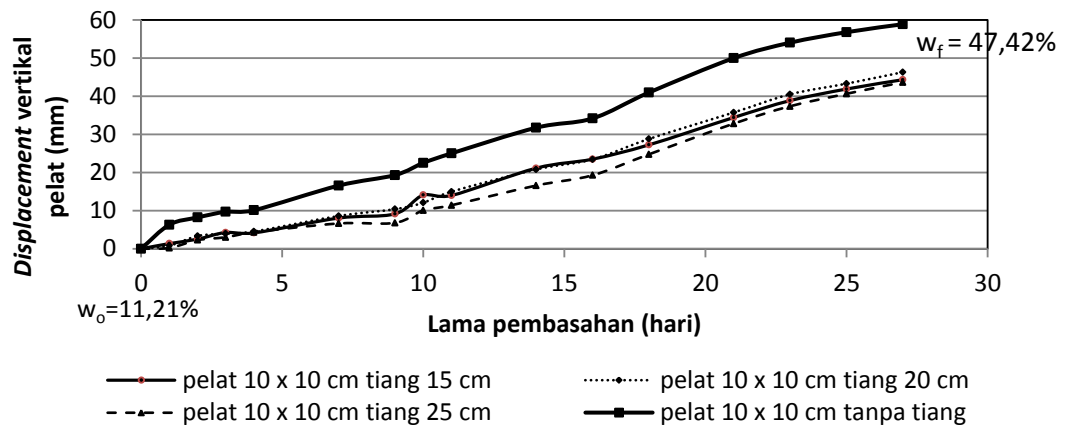
(a). Sistem Pelat Terpaku dengan tiang $d=2$ cm, $L=20$ cm, $s=10$ cm



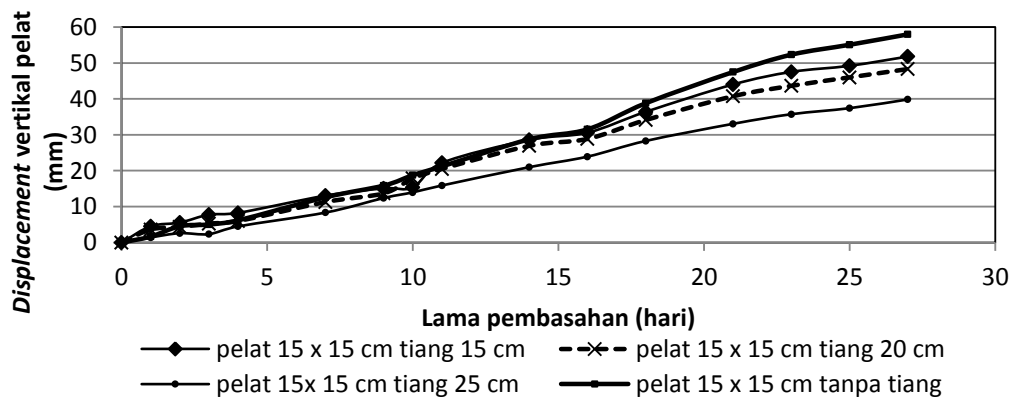
(b). Sistem Pelat Terpaku dengan tiang $d=2$ cm, $L=20$ cm, $s=15$ cm

Gambar 5.3. Pengaruh spasi tiang terhadap *displacement* pada sistem pelat terpaku akibat pembasahan tanah ($w_o=11,21\%$ dan $w_f=47,42\%$).

Selain pengujian terhadap sistem pelat terpaku, pengujian juga dilakukan pada model pelat dengan satu tiang. Hasil pengujian pelat dengan tiang tunggal seperti pada Gambar 5.22 dan Gambar 5.23.



Gambar 5.4. Perbandingan kenaikan permukaan pelat perhari berukuran 10 cm x 10 cm tanpa tiang dan dengan tiang panjang 15 cm, 20 cm dan 25 cm akibat pembasahan ($w_0=11,21\%$ dan $w_f=47,42\%$)

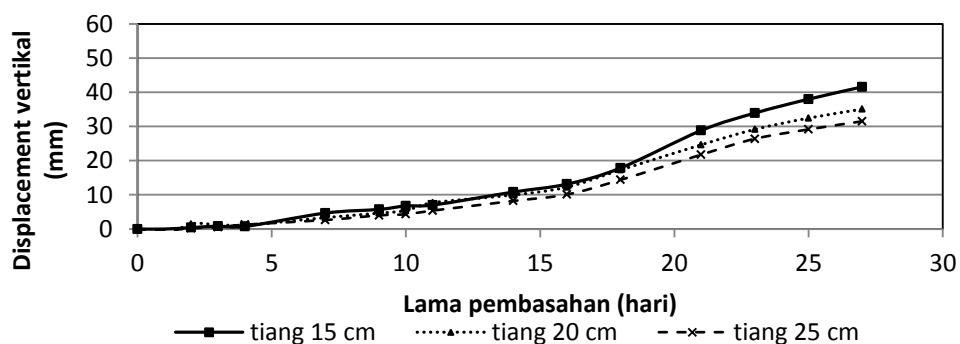


Gambar 5.5. Perbandingan kenaikan permukaan pelat perhari berukuran 15 cm x 15 cm tanpa tiang dan dengan tiang panjang 15 cm, 20 cm dan 25 cm akibat pembasahan ($w_0=11,21\%$ dan $w_f=47,42\%$)

Dari Gambar 5.4 dan Gambar 5.5 tersebut dapat disimpulkan bahwa *displacement* vertikal pelat merupakan fungsi dari tekanan, pelat dengan ukuran 10 cm x 10 cm dan 15 cm x 15 cm terlihat menghasilkan *displacement* vertikal yang hampir sama. Pada perkuatan pelat dengan tiang, pelat dengan perkuatan

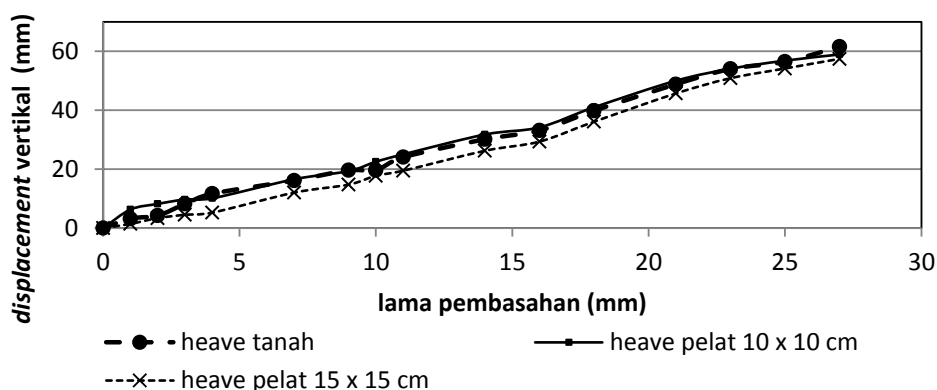
tiang mengalami *displacement vertikal* pelat yang lebih kecil dibandingkan dengan pelat tanpa perkuatan tiang. Pengaruh panjang tiang pada pelat individual (satu tiang) sangat terlihat jelas, semakin panjang tiang, *displacement vertikal* pada permukaan pelat semakin kecil, hal ini terjadi baik pada pelat berukuran 10 cm x 10 cm maupun 15 cm x 15 cm.

Gambar 5.6 menunjukkan *displacement vertikal* pada tiang saja. Dari gambar tersebut dapat diketahui, semakin panjang tiang *displacement vertikal* tiang akibat mengembangnya tanah lebih kecil pada tiang yang lebih panjang.



Gambar 5.6. Perbandingan kenaikan tiang (tanpa pelat) akibat pembasahan ($w_o=11,21\%$ dan $w_f=47,42\%$)

Gambar 5.7 Gambar 5.8 menunjukkan perbandingan *displacement vertikal* pada pelat tanpa perkuatan tiang. Dari gambar tersebut, terlihat bahwa *heave* tanah, dan *displacement vertikal* pada pelat berukuran 10 cm x 10 cm dan 15 cm x 15 cm menunjukkan hasil yang hampir sama, hal ini menunjukkan bahwa *displacement* merupakan fungsi dari tekanan. Pada pelat yang berukuran lebih besar, gaya angkat menjadi lebih besar, tetapi pelat memiliki gaya perlawanan berupa berat sendiri yang juga lebih besar, begitu sebaliknya, sehingga pada pelat berukuran 10 cm x 10 cm dan 15 cm x 15 cm, menunjukkan *displacement vertikal* yang sama.



Gambar 5.7. Perbandingan *heave* tanah, *displacement* vertikal pelat saja dengan ukuran 10 cm x 10 cm dan pelat 15 cm x 15 cm akibat pembasahan ($w_o=11,21\%$ dan $w_f=47,42\%$)

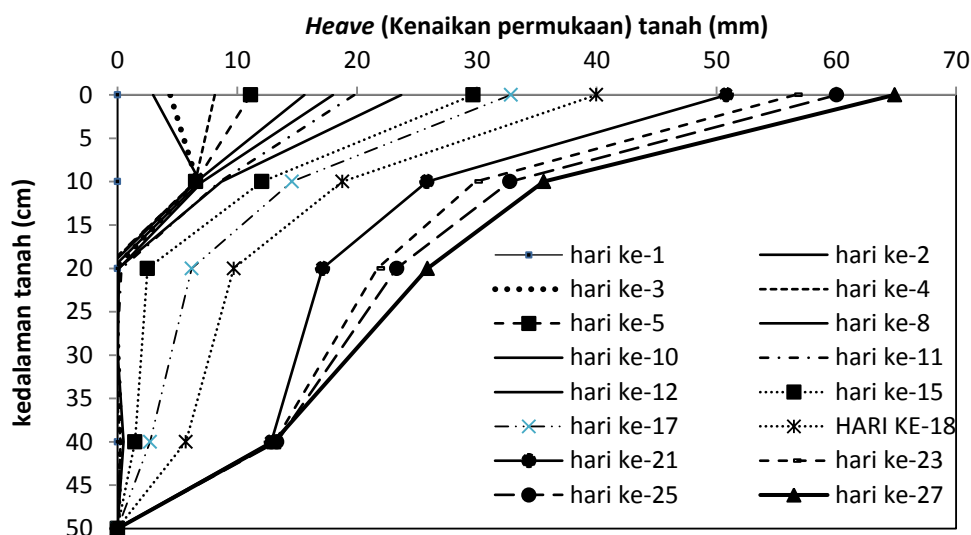
Tabel 5.3 merangkum *displacement* vertikal yang terjadi pada model pelat dengan tiang tunggal dengan variasi panjang tiang. Pelat dengan tiang yang lebih panjang akan mengalami *displacement* vertikal akibat pembasahan yang lebih kecil.

Tabel 5.3. *Displacement* vertikal pelat sistem pelat terpaku

Ukuran pelat (cm)	Panjang tiang (cm)	<i>displacement</i> vertikal pada pelat (mm)	Reduksi <i>displacement</i> vertikal (%)
10 x 10	-	58,90	-
	15	44,35	24,70
	20	45,53	22,53
	25	43,68	25,84
15 x 15	-	57,40	-
	15	54,30	5,40
	20	48,31	15,83
	25	39,85	30,57

Distribusi *displacement* vertikal tanah (*heave*) terhadap kedalaman tanah seperti pada Gambar 5.8. Perpindahan tiang dipengaruhi oleh *heave* tanah pada seluruh ketebalannya. *Heave* yang terjadi pada tanah tidak seragam sepanjang kedalamannya. *Heave* terbesar terjadi pada bagian atas (permukaan tanah), dan berkurang terhadap kedalaman. Sehingga lapisan atas lebih besar kontribusinya dalam menarik tiang ke atas, dan bagian yang lebih dalam pengaruhnya terhadap

perpindahan tiang lebih kecil. Sehingga bagian yang lebih bawah (dalam) tiang tertahan (*restraint*). Tahanan terhadap kenaikan ini disebabkan karena pengaruh *heave* yang tidak seragam pada sepanjang kedalaman. Tiang yang lebih panjang akan mengalami *displacement* vertikal yang lebih kecil.



Gambar 5.8. Distribusi *heave* tanah sepanjang kedalaman pada pengujian model

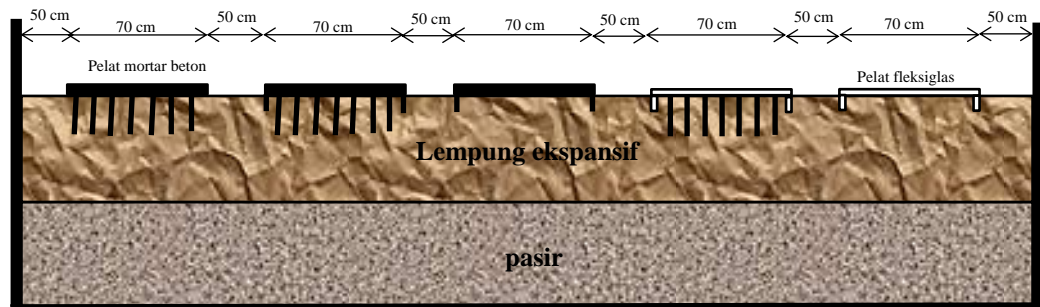
I

2. Hasil Pengamatan *Displacement* Vertikal Akibat Pengembangan Tanah Pada Pengujian model II.

Pengujian model II dilakukan pada kolam dengan model pelat, diantara model pelat, sisi sebelah kiri dan kanan pelat tanpa ada sekat drainasi dari batu pecah. Pada pengujian tahap II ini juga dimodelkan pelat dengan koperan, yang diharapkan berfungsi sebagai penghalang kelembaban vertikal dan perkuatan tepi perkerasan. Variasi lainnya pada pengujian model II ini adalah dengan mengganti pelat dari mortar beton dengan pelat berbahan plastik, dalam pengujian ini digunakan pelat fleksiglas (mika) dengan ketebalan 5 mm, yang diharapkan memiliki kekakuan yang lebih rendah dibandingkan pelat berbahan mortar beton.

Gambar 5.9 menampilkan skema dan model pelat pada pengujian model II. Pengembangan tanah dipicu dengan membasahi tanah setiap hari sebanyak 320 liter untuk kolam uji berukuran 700 cm x 350 cm dan ketebalan tanah ekspansif

50 cm. *Displacement* pada pelat akibat mengembangnya tanah dasar di ukur setiap hari.



(a). Sketsa model dalam kolam pengujian



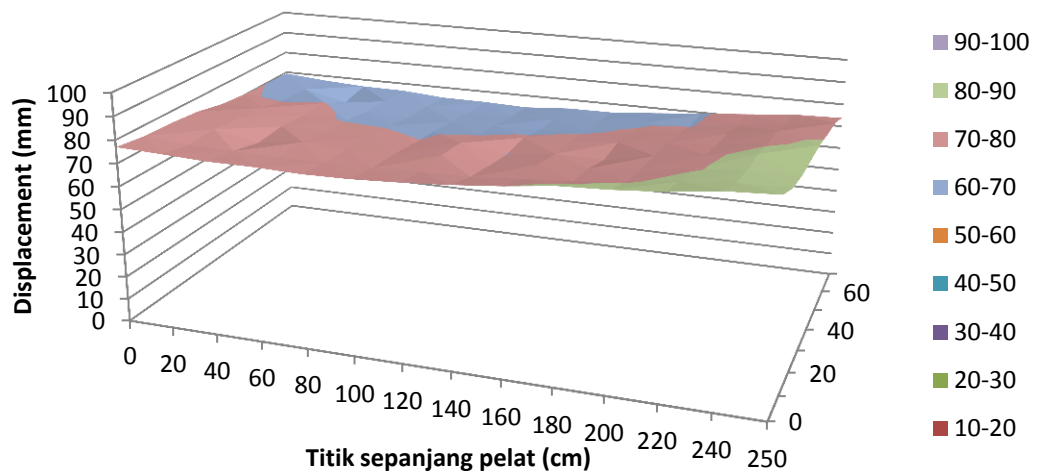
(b). Model pelat di kolam uji selama pembasahan

Gambar 5.9. Model pelat pada pengujian model II

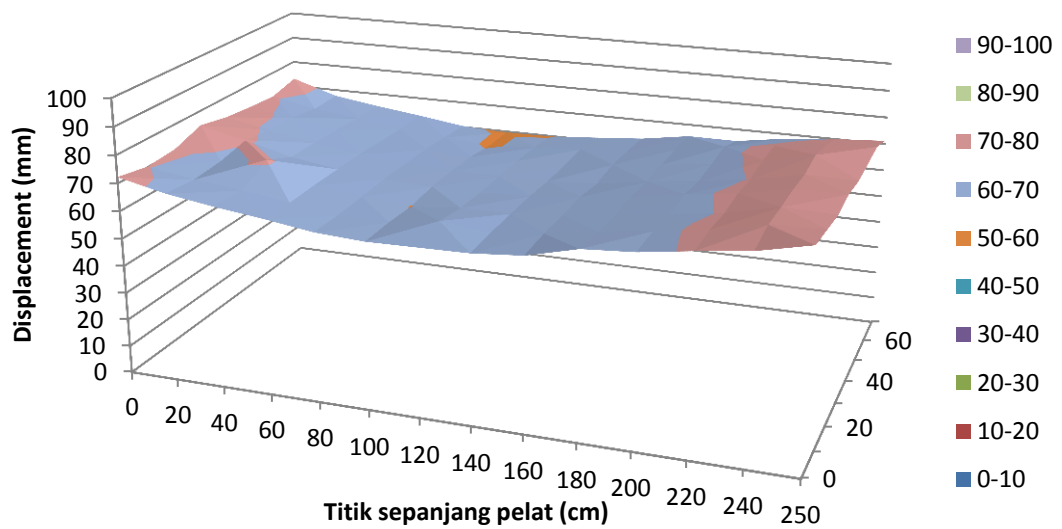
Pengujian dilakukan selama 30 hari, kadar air tanah pada awal pengujian $w_o=13,74\%$ dan derajat kejenuhan $S=0,3871$, pada akhir pengujian kadar air rerata pada permukaan tanah sebesar $w_f=49,19\%$ dan derajat kejenuhan $S=1,0074$, dengan *displacement* maksimum pengamatan mencapai kurang lebih 100 mm. *Heave* tanah terukur kurang lebih 20% dari ketebalan tanah ekspansif. *Displacement* yang dihasilkan dari pengujian model II ini lebih besar daripada *displacement* terukur pada pengujian model I. Besarnya *displacement* pada pengujian model II disebabkan karena ketiadaan drainasi tepi perkerasan. Air terserap semua ke tanah ekspansif, sehingga pengembangan menjadi sangat besar.

Pada pengujian model I, adanya sekat drainasi dari batu pecah menyebabkan air mengalir ke batu pecah, dan dialirkan ke lapisan bawah, sehingga prosentase air yang terserap tanah ekspansif lebih sedikit. Pembasahan kolam uji akan memicu pengembangan tanah, model pelat akan mengalami displacement ke atas akibat mengembangnya tanah dasar. *Displacement* model pelat setelah 30 hari pembasahan seperti pada Gambar 5.10 sampai Gambar 5.13. Gambar 5.28 menyajikan perbandingan *displacement* antara pelat tanpa perkuatan tiang dan pelat dengan perkuatan tiang, masing-masing dengan menggunakan koperan ditepi-tepi perkerasan. Kontribusi tiang dalam menahan pelat pada tanah ekspansif mengembang dapat dilihat dari gambar tersebut. Kenaikan kadar air dari kadar air awal $w_o=13,74\%$, menjadi $w_f=49,19\%$ menyebabkan permukaan tanah yang tidak tertutupi pelat mengembang, akibatnya bagian tepi-tepi pelat dan ujung pelat terangkat. Perkuatan tiang mampu menahan pelat dan mereduksi *displacement* ke atas pelat. Gaya perlawanan diperoleh dari berat sendiri pelat, tahanan gesek tiang, dan berat sendiri tiang.

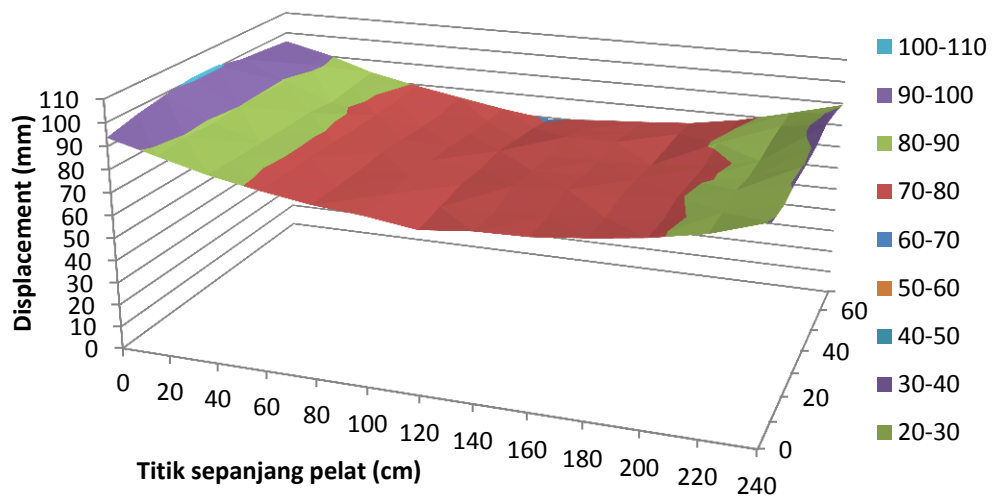
Gambar 5.11 menampilkan pengaruh perkuatan tiang pada pelat dari bahan fleksiglass ditinjau dari *displacement* yang diakibatkan oleh mengembangnya tanah dasar. Penggunaan bahan fleksiglas dimaksudkan untuk memodelkan pelat dengan kekakuan yang relatif lebih kecil daripada pelat yang terbuat dari mortar semen. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa dengan perkuatan tiang, *displacement* yang terjadi semakin kecil. Tiang mampu untuk menahan pelat fleksiglass tetap menumpu pada tanah. Pada pelat tanpa perkuatan tiang, dari pengamatan visual di lapangan, diketahui, tanah yang mengalami pengembangan adalah tanah dibagian tepi-tepi pelat, sehingga bagian tepi-tepi ini terangkat, sementara tanah bagian tengah belum mengalami pengembangan. Pola deformasi pelat adalah *edge heave*, dimana bagian tepi mengalami pengangkatan, karena pengembangan tanah bagian tepi lebih dahulu. Perilaku deformasi ini terlihat baik pada pelat dengan perkuatan tiang, maupun pelat tanpa perkuatan tiang.



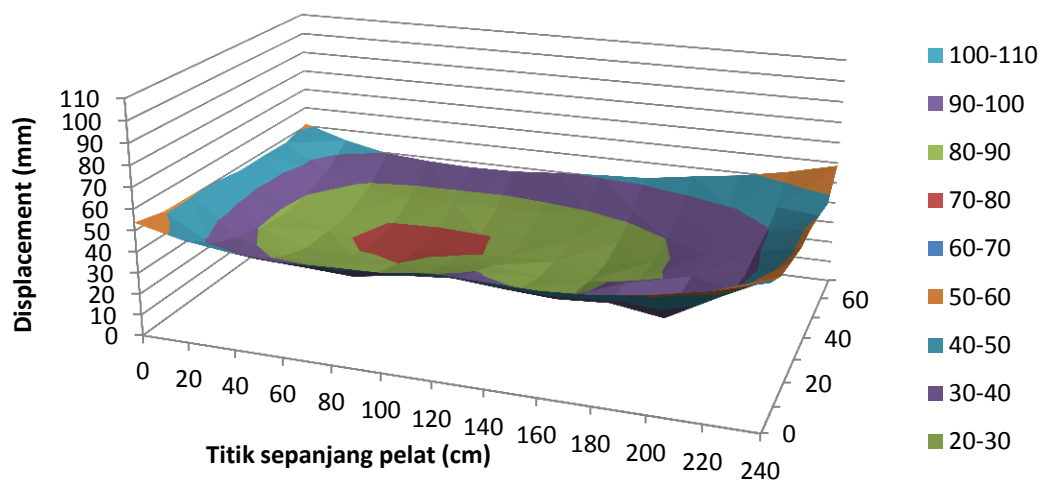
(a). Pelat tanpa tiang

(b). Sistem pelat terpaku tiang $d=2$ cm, $L=20$ cm, $s=10$ cm

Gambar 5.10. Pengaruh perkuatan tiang pada pelat (bahan mortar semen) terhadap *displacement* akibat pembasahan tanah ($w_o=13,74\%$ dan $w_f=49,19\%$)



(a). Pelat fleksiglass tanpa tiang



(b). Sistem pelat (fleksiglass) terpaku tiang d=2 cm, L=20 cm, s=10 cm

Gambar 5.11. Pengaruh perkuatan tiang pada pelat (bahan mortar semen) terhadap *displacement* akibat pembasahan tanah ($w_o=13,74\%$ dan $w_f=49,19\%$)

Gambar 5.12 menunjukkan deformasi pelat selama pembasahan yang didokumentasikan saat pengujian. Gambar tersebut merupakan tampak asli dari grafik pada Gambar 5.11.



(a). Pelat fleksiglass tanpa tiang

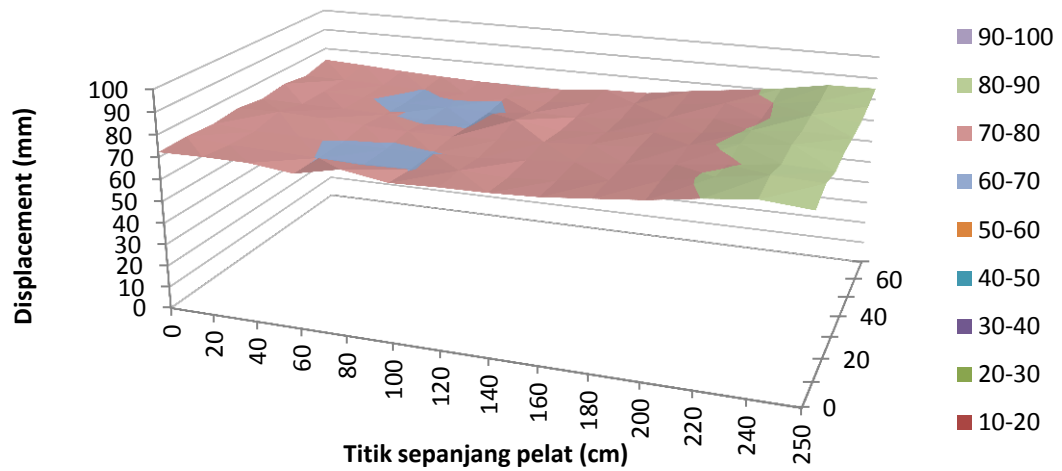


(b) Pelat fleksiglass dengan perkuatan tiang

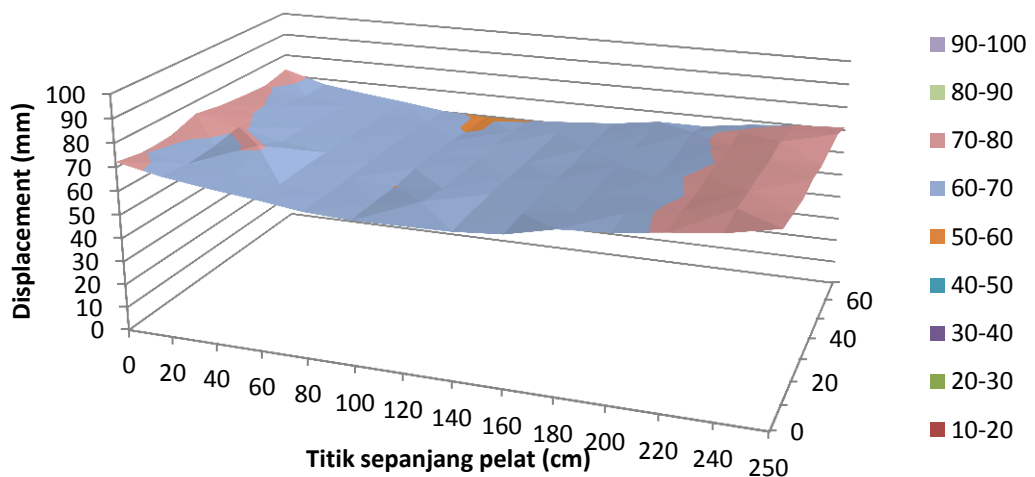
Gambar 5.12. Foto deformasi pelat (fleksiglass) akibat pembasahan tanah ($w_o=13,74\%$ dan $w_f=49,19\%$)

Deformasi yang terjadi pada pelat yang terbuat dari mortar semen berbeda dengan deformasi pelat dari material fleksiglass. Pelat dari fleksiglass menunjukkan pola deformasi *edge heave* yang jelas, sedangkan pelat dari mortar semen pola deformasi *edge heave* tidak tampak jelas. Perbedaan ini dikarenakan karena kekakuan pelat, dalam hal ini modulus elastisitas dan ketebalan pelat yang berbeda. Pelat dari mortar semen lebih kaku dibandingkan pelat fleksiglass, sehingga walaupun deformasi (*heave*) tanah dasar tidak merata (besar dibagian tepi pelat dan berkurang dibagian tengah), deformasi pelat tidak mengikuti deformasi tanah, karena kekakuan pelat yang besar.

Gambar 5.13 menunjukkan pengaruh pemasangan koperan (pelat vertikal) di bagian tepi-tepi pelat. Pemasangan koperan ini berfungsi juga sebagai penghalang vertikal masuknya air ke bawah pelat atau yang disebut *moisture barrier*. Dari gambar tersebut, diketahui pelat dengan pemasangan koperan dibagian tepi-tepi pelat, pelat mengalami deformasi yang lebih kecil. Deformasi pelat di bagian ujung-ujung perkerasan lebih dominan, karena bagian ujung tersebut air dapat lebih mudah masuk (tanpa penghalang).



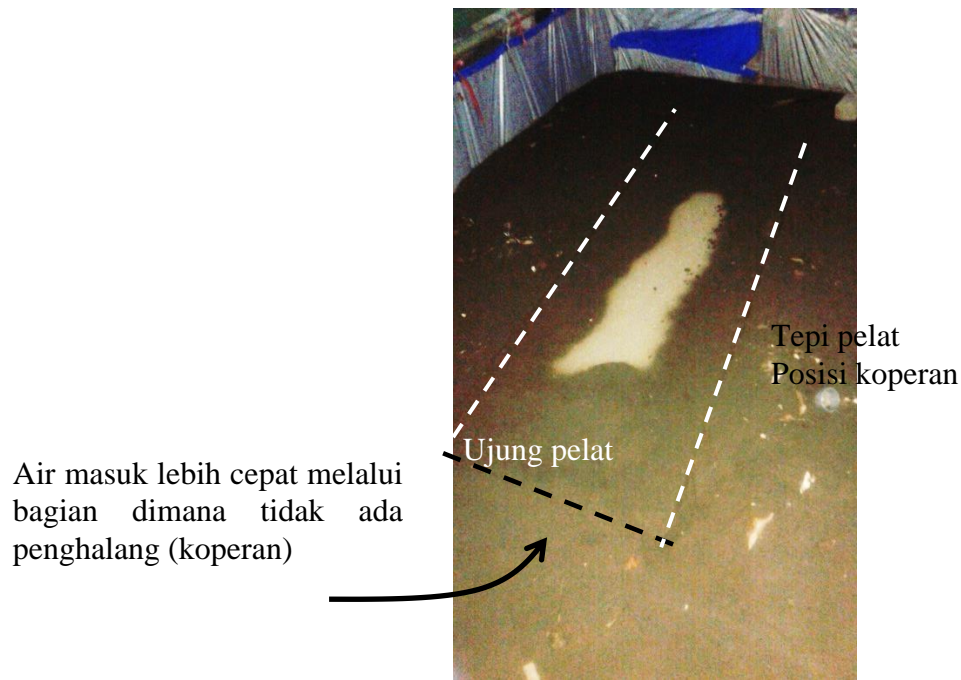
(a). Sistem pelat terpaku dengan tiang $d=2$ cm, $L=20$ cm, $s=10$ cm



(b). Sistem pelat terpaku dengan tiang $d=2$ cm, $L=20$ cm, $s=10$ cm dengan koperan

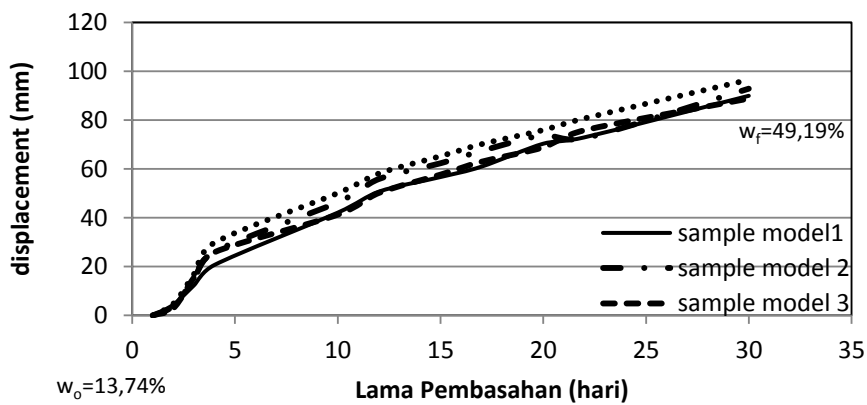
Gambar 5.13. Pengaruh penggunaan koperan terhadap *displacement* sistem pelat terpaku akibat pembasahan tanah ($w_o=13,74\%$ dan $w_f=49,19\%$)

Gambar 5.14 menunjukkan sebaran perubahan kadar air tanah di bawah model pelat fleksiglass tanpa tiang dengan koperan. Gambar tersebut menunjukkan bahwa air lebih dominan mengalir dari ujung-ujung perkerasan daripada dari tepi perkerasan. Koperan yang dipasang pada tepi-tepi perkerasan mampu memperlambat masuknya aliran air. Bagian tengah dari gambar yang berwarna terang menunjukkan tanah dengan kadar air yang rendah.



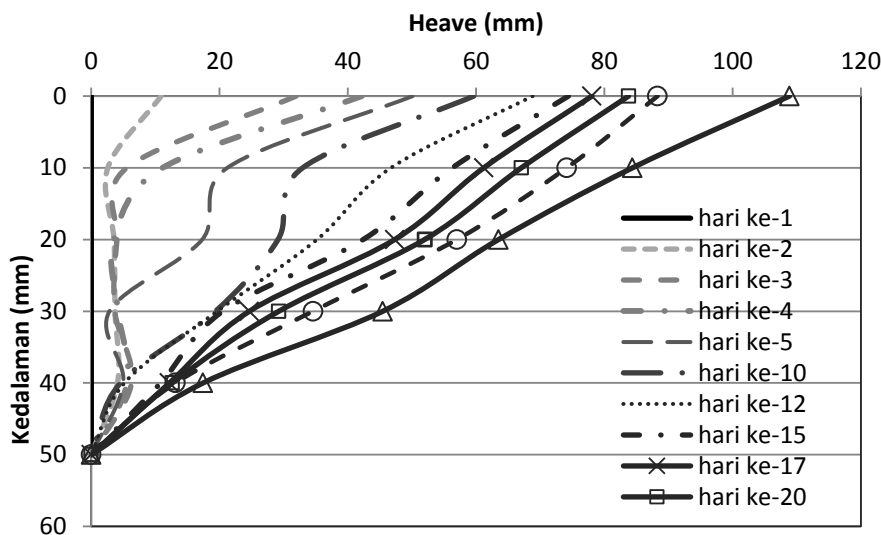
Gambar 5.14. Kondisi tanah di bawah pelat setelah pembasahan

Gambar 5.15 menunjukkan *displacement* vertikal pelat berukuran 10 cm x 10 cm dengan tiang tunggal berukuran panjang (L)=20 cm. Rerata *displacement* pelat dengan tiang tunggal dari empat model sebesar 92.02 mm.



Gambar 5.15. *Displacement* yang terjadi pada model pelat mortar beton berukuran 10 cm x 10 cm dengan tiang tunggal $d=2$ cm, dan $L=20$ cm akibat pembasahan tanah ($w_o=13,74\%$ dan $w_f=49,19\%$)

Gambar 5.16 menunjukkan *heave* tanah sepanjang ketebalan tanah ekspansif. Ketebalan tanah ekspansif 50 cm. *Heave* yang terjadi dipermukaan sebesar 108.87 mm, semakin ke bawah *heave* semakin kecil.



Gambar 5.16. Distribusi *heave* sepanjang ketebalan tanah pada pengujian model II ($w_o=13,74\%$ dan $w_f=49,19\%$)

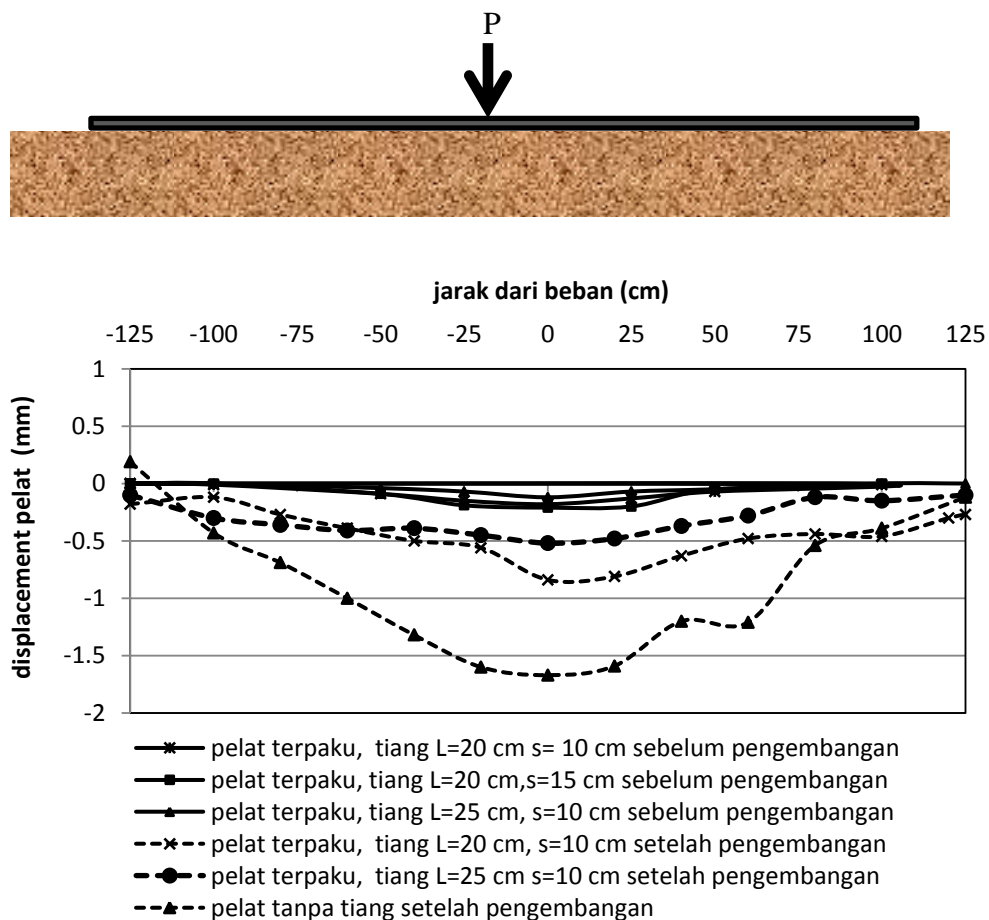
3. Hasil Uji Pembebanan Model Pelat Terpaku Model I

Uji pembebanan dilakukan sebelum dan setelah pengembangan tanah, dilakukan dengan maksud untuk mengetahui perilaku model pelat terhadap pembebanan, dan membandingkan perilakunya sebelum dan sesudah pengembangan. Beban diletakan di tengah-tengah pelat, dan *displacement* (penurunan) diukur dari jarak beban ke titik tinjauan. Pembebanan mengikuti ASTM D 1195, untuk setiap kali penambahan beban dan defleksi ditentukan pada saat kecepatan penurunan mencapai 0,03 mm/menit. Hasil pengamatan perilaku pelat terhadap pembebanan sebelum dan setelah pembasahan pada beban sebesar 200 kg seperti terlihat dalam Gambar 5.17. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa setelah terjadi pengembangan, defleksi pelat akibat pembebanan menjadi lebih besar dan luasan yang terpengaruh beban semakin lebar. Hal ini disebabkan karena selama pengembangan terjadi penurunan kekuatan geser tanah, sehingga

kapasitas dukung dan penurunan menjadi lebih besar. Perbandingan penurunan yang terjadi pada saat model pelat dibebani dengan beban 200 kg seperti pada Tabel 5.4.

Tabel 5.4. *Displacement* di bawah titik beban $P=200$ kg pada model pelat

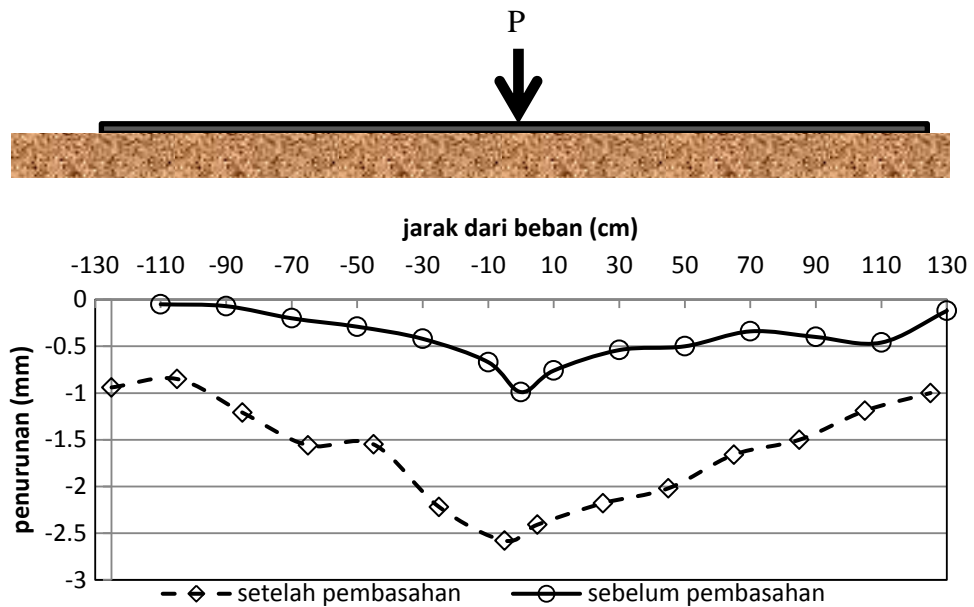
Model Pelat	Panjang tiang (cm)	Spasi antar tiang (cm)	Displacement akibat beban $P=200$ kg (mm)		Persen kenaikan displacement (%) terhadap pengembangan tanah
			Sebelum pengembangan	Setelah pengembangan	
Pelat saja	-	-	-0,35	-1,67	3,77
Pelat terpaku	20	10	-0,18	-0,84	3,67
	20	15	-0,21	-0,89	3,24
	25	10	-0,12	-0,52	3,33



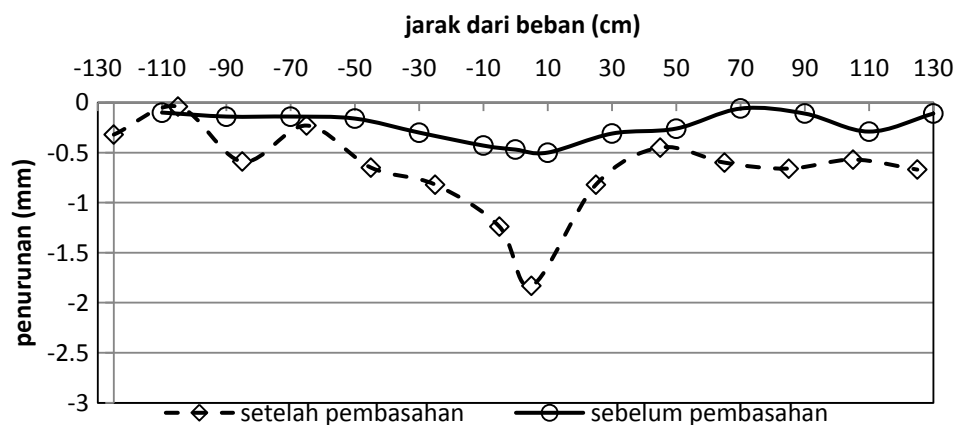
Gambar 5.17. Perilaku pelat terhadap pembebanan sebelum dan setelah pembasahan tanah ($w_o=13,74\%$ dan $w_f=49,19\%$)

4. Hasil Uji Pembebanan Model Pelat Terpaku Model II

Pembebanan pada model pelat Model II, dilakukan seperti pada uji pembebanan tahap I, beban diletakan di tengah pelat, *displacement* akibat beban diukur pada titik-titik sepanjang pelat. Hasil uji pembebanan seperti pada Gambar 5.18.



(a) Sistem Pelat Terpaku dengan tiang $d=2$ cm, $L=20$ cm, $s=10$ cm, tanpa koperan



(b). Sistem Pelat Terpaku dengan tiang $d=2$ cm, $L=20$ cm, $s=10$ cm, dengan koperan

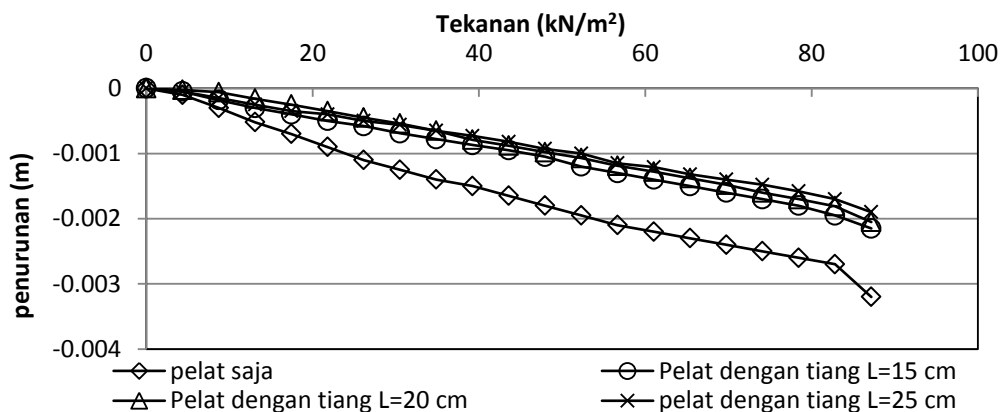
Gambar 5.18. Defleksi akibat pembebanan pada model pelat sebelum dan sesudah pembasahan ($w_o=13,74\%$ dan $w_f=49,19\%$)

Hasil uji pembebanan menunjukkan perilaku pelat terhadap pembebanan sama dengan perilaku pelat pada uji pembebanan model I. *Displacement* akibat beban pada intensitas pembebanan (beban titik) sebesar 200 kg untuk berbagai variasi pelat menunjukkan bahwa, *displacement* setelah pembasahan lebih besar dibandingkan *displacement* yang terjadi pada uji beban sebelum dibasahi. Penurunan kekuatan geser tanah akibat pengembangan, menyebabkan *displacement* yang terjadi pada pembebanan setelah pembasahan meningkat.

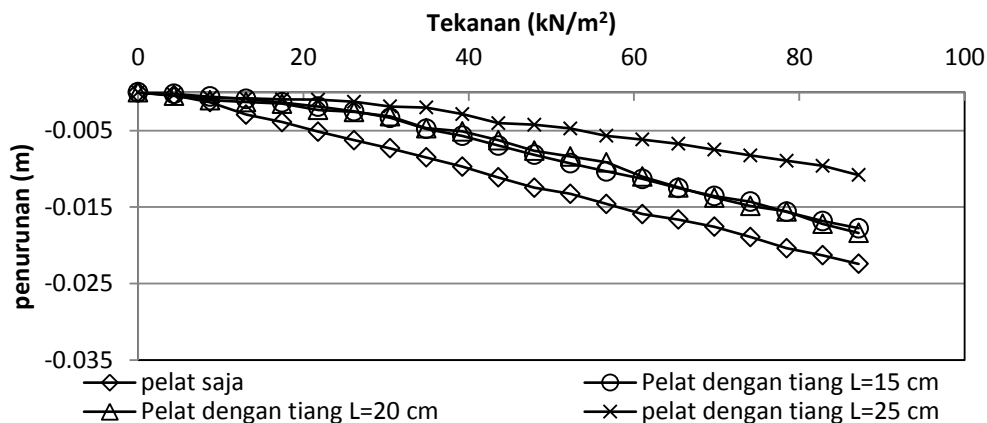
5. Hasil Uji Pembebanan Model Pelat dengan Tiang Tunggal Pengujian Model I

Pada pengujian pembebanan model pelat dengan tiang tunggal, ukuran pelat yang digunakan adalah 10 cm x 10 cm dan pelat 15 cm x 15 cm, dengan tiang berdiameter 2 cm, dan panjang 15 cm, 20 cm, dan 25 cm. Pembebanan secara repetitif, dengan pemberian beban berikutnya dan penentuan *displacement* dilakukan setelah kecepatan *displacement* 0,03 mm/menit.

Hasil pengujian pembebanan pelat tanpa tiang dan dengan tiang tunggal seperti pada Gambar 5.18 sampai Gambar 5.20. Gambar tersebut menunjukkan hubungan antara tekanan dan penurunan pelat. Dari Gambar tersebut dapat dilihat bahwa pemasangan tiang meningkatkan tahanan dukung tanah, baik pada kondisi kering, maupun kondisi setelah dibasahi



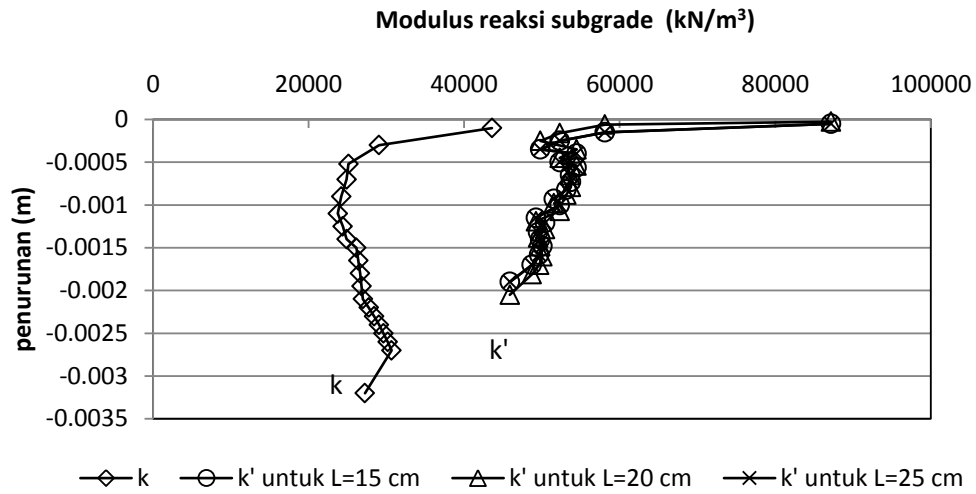
Gambar 5.19. Kurva tekanan-penurunan pada uji beban pelat 15 cm x 15 cm tanpa tiang dan dengan tiang tunggal sebelum pembasahan tanah dasar ($w_o=11,21\%$)



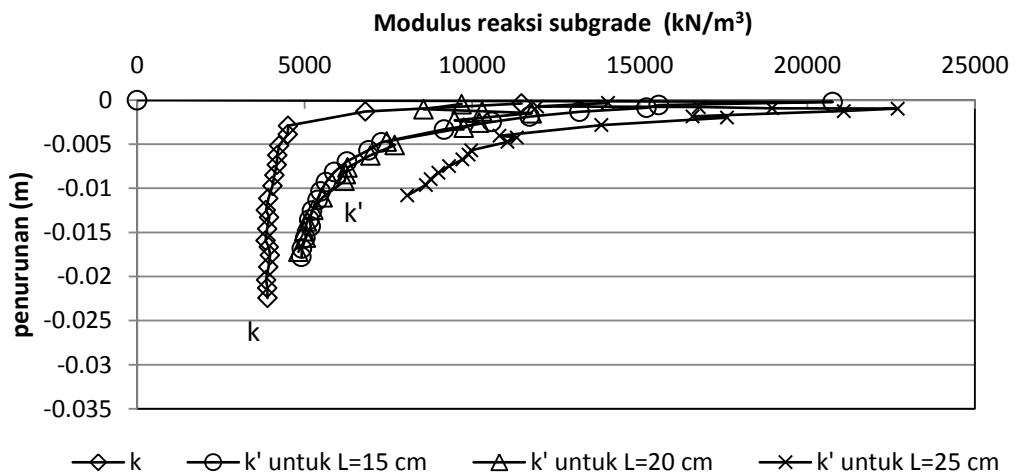
Gambar 5.20. Kurva tekanan-penurunan pada uji beban pelat 15 cm x 15 cm tanpa tiang dan dengan tiang tunggal setelah pembasahan tanah dasar ($w_f=47,42\%$)

Pada intensitas beban yang sama, *displacement* yang terjadi pada pelat yang diperkuat dengan tiang lebih kecil dibandingkan dengan *displacement* yang terjadi pada pelat saja. Semakin panjang tiang *displacement* yang terjadi cenderung semakin kecil.

Modulus reaksi subgrade merupakan rasio antara tekanan dan penurunan. Hasil uji pembebanan seperti pada Gambar 5.19 dan Gambar 5.20 dapat dianalisis modulus reaksi subgrade. Gambar 5.21 menunjukkan hubungan antara modulus reaksi subgrade dengan penurunan. Gambar tersebut mengindikasikan bahwa dengan bertambahnya penurunan, modulus reaksi subgrade berkurang. Hal ini menunjukkan bahwa respon tekanan tanah tidak berbanding lurus dengan penurunan. Simbol k menunjukkan hasil modulus reaksi subgrade pada pelat tanpa tiang, sedangkan k' merupakan hasil analisis modulus reaksi subgrade pada pelat dengan tiang. Dari Gambar 5.21 dan Gambar 5.22 dapat diketahui, dengan pemasangan tiang, modulus reaksi subgrade meningkat. Peningkatan modulus reaksi subgrade terlihat selain pada kondisi kering juga pada kondisi basah. Semakin panjang tiang, modulus reaksi subgrade semakin meningkat.

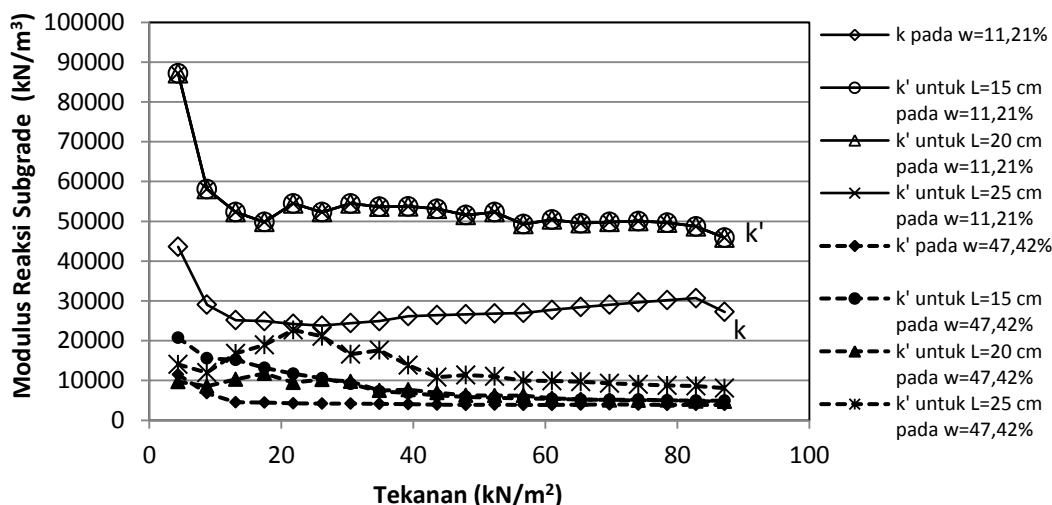


Gambar 5.21. Pengaruh pemasangan tiang terhadap modulus reaksi subgrade (k') fungsi dari penurunan kondisi tanah sebelum dibasahi ($w_0=11,21\%$)



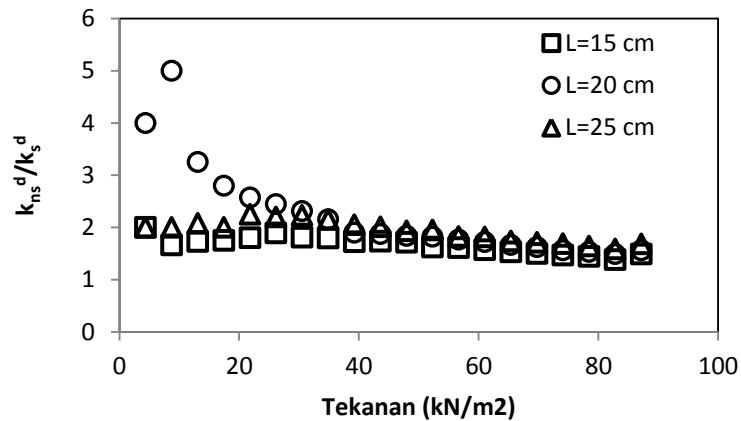
Gambar 5.22. Pengaruh pemasangan tiang terhadap modulus reaksi subgrade (k') fungsi dari penurunan kondisi tanah setelah dibasahi ($w_f=47,42\%$)

Gambar 5.23 menunjukkan perbandingan modulus reaksi subgrade sebagai fungsi dari tekanan. Dari gambar tersebut tampak bahwa pada tekanan yang rendah, modulus reaksi subgrade sangat besar, kemudian turun sampai pada tekanan sekitar 20 kN/m^2 , dan setelah itu relatif tetap.

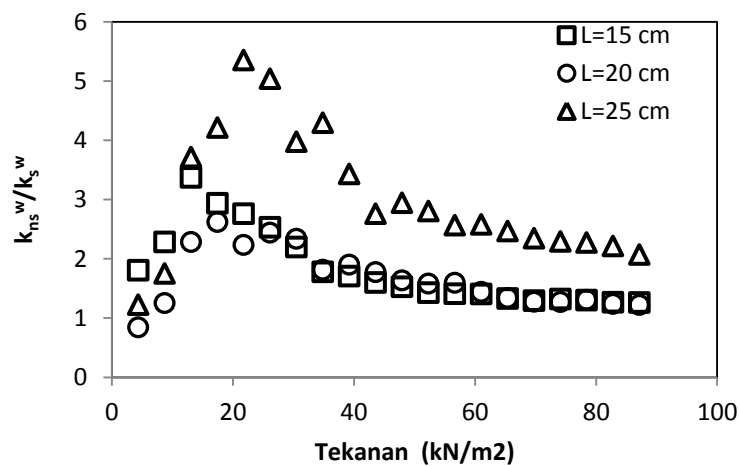


Gambar 5.23. Pengaruh pemasangan tiang terhadap modulus reaksi subgrade (k') fungsi dari tekanan, pada kondisi tanah sebelum dan setelah dibasahi ($w_o=11,21\%$ dan $w_f=47,42\%$)

Gambar 5.24 menunjukkan rasio antara modulus reaksi subgrade sistem pelat terpaku (k_{ns}) dengan modulus reaksi subgrade pada pelat saja (k_s) pada kondisi awal (k_{ns}^d/k_s^d), dan Gambar 5.25 perbandingan antara modulus reaksi subgrade pada kondisi basah (k_{ns}^w/k_s^w). Dari gambar tersebut terlihat bahwa sistem pelat terpaku menghasilkan modulus reaksi subgrade yang lebih besar dibandingkan pelat tanpa perkuatan tiang, baik pada kondisi kering maupun basah. Pengaruh perkuatan pelat dengan menggunakan tiang terhadap modulus reaksi subgrade lebih terlihat pada kondisi basah. Pada kondisi awal (sebelum dibasahi, $w_o=13,74\%$, $S=0,38707$) modulus reaksi subgrade sistem pelat terpaku sekitar 1,8 sampai 2 kali lebih besar dibandingkan pelat tanpa perkuatan. Sedangkan pada kondisi basah, pelat terpaku menghasilkan modulus reaksi subgrade 1,8 sampai 3 kali lebih besar dibanding sistem pelat saja, semakin panjang tiang perbandingan modulus reaksi subgrade semakin besar.

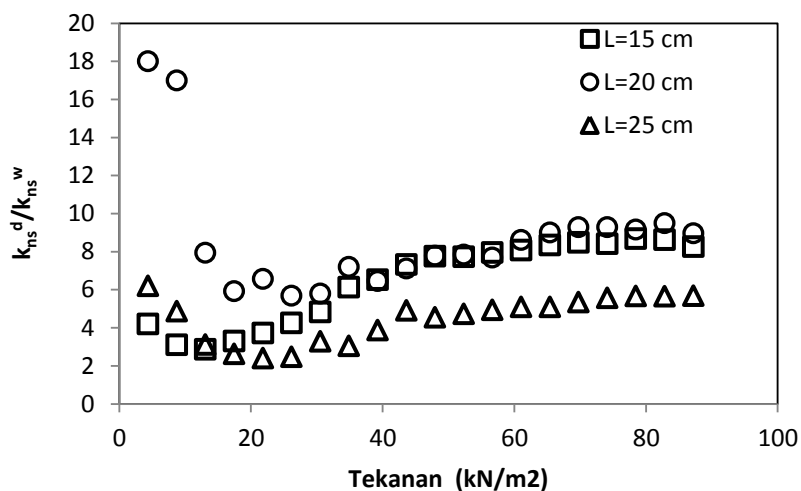


Gambar 5.24. Rasio modulus reaksi tanah k_{ns}^d/k_s^d terhadap tekanan pada kondisi awal ($w_o=11,21\%$) dengan berbagai variasi panjang tiang



Gambar 5.25. Rasio modulus reaksi tanah k_{ns}^w/k_s^w terhadap tekanan setelah dibasahi ($w_f=47,42\%$) dengan berbagai variasi panjang tiang

Gambar 5.26 menunjukan perbandingan modulus reaksi subgrade sistem pelat terpaku pada kondisi kering dan kondisi basah (k_{ns}^d/k_{ns}^w). Dari gambar tersebut terlihat bahwa modulus reaksi subgrade pada kondisi awal 4 sampai 8 kali lebih besar dibandingkan kondisi basah. Semakin panjang tiang rasio antara modulus reaksi subgrade pada kondisi awal dan kondisi basah semakin kecil, hal ini dapat diartikan bahwa dengan memperpanjang tiang, penurunan modulus reaksi subgrade akibat pembasahan tanah semakin kecil.



Gambar 5.26. Rasio modulus reaksi tanah k_{ns}^d/k_{ns}^w terhadap tekanan setelah dibasahi dengan berbagai variasi panjang tiang ($w_o=11,21\%$ dan $w_f=47,42\%$)

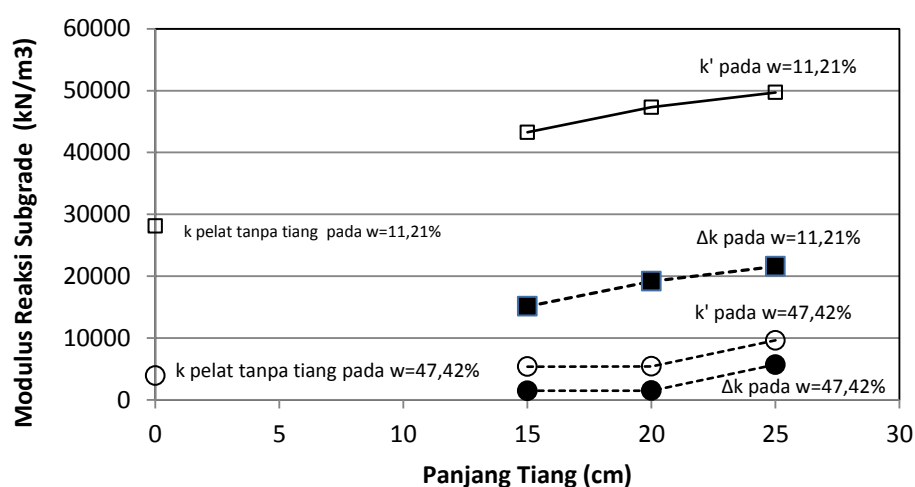
Perbandingan modulus reaksi subgrade model pelat sebelum dan setelah pembasahan seperti dalam Tabel 5.5. Modulus reaksi subgrade sebagaimana tercantum dalam tabel tersebut diperoleh dari modulus tangen kurva tekanan versus penurunan.

Tabel 5.5. Modulus reaksi subgrade sebelum dan setelah pembasahan

Ukuran pelat (cm)	Panjang tiang (cm)	modulus reaksi subgrade (k) (kN/m^3)		Δk	
		Sebelum pembasahan $w=11,21\%$	Sesudah pembasahan $W=47,42$	sebelum pembasahan	setelah pembasahan
10 x 10	-	26295,1	2168,2	-	-
	15	31282,1	2692,6	4987,0	524,4
	20	-	2864,4	-	696,2
	25	34941,5	4190,1	8646,4	2021,9
15 x 15	-	28116,6	3921,8	-	-
	15	43256,6	5406,3	15140,0	1484,5
	20	47310,4	5443,3	19193,8	1521,5
	25	49717,4	9631,6	21600,8	5709,2

Gambar 5.27 menyajikan perbandingan modulus reaksi subgrade berdasarkan panjang tiang. Dari Tabel 5.5 dan Gambar 5.27 diketahui bahwa

model pelat terpaku menghasilkan modulus reaksi subgrade yang lebih besar dibandingkan model pelat tanpa tiang. Tambahan modulus reaksi subgrade diperoleh dari tahanan gesek yang berkembang pada selimut tiang. Akibat pebasahan tanah, terjadi penurunan modulus reaksi subgrade, penurunannya mencapai 80%-90% dibandingkan sebelum terjadi pembasahan tanah. Tambahan modulus reaksi subgrade karena pemasangan tiang (Δk), semakin besar dengan semakin panjangnya tiang.

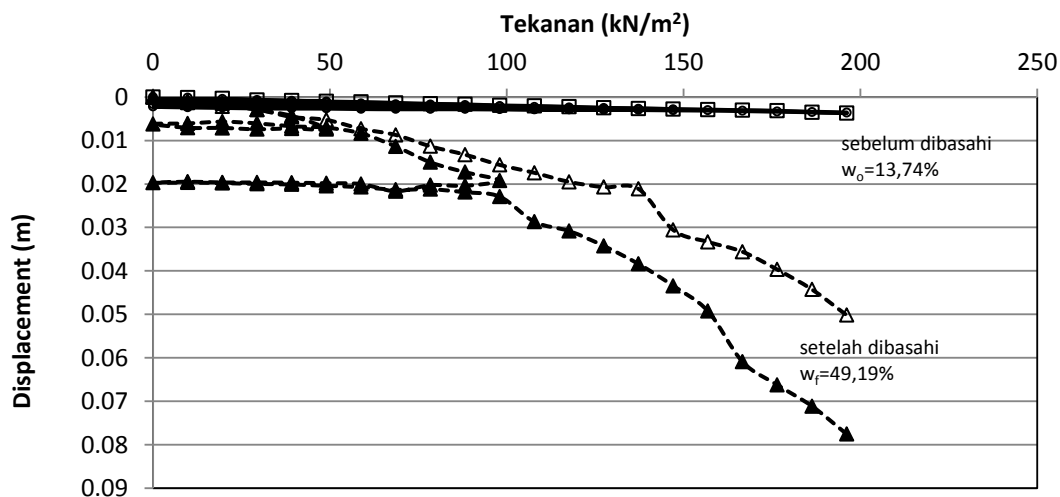


Gambar 5.27. Perbandingan modulus reaksi subgrade terhadap variasi panjang tiang ($w_o=11,21\%$ dan $w_f=47,42\%$)

6. Hasil Uji Pembebanan Model Pelat dengan Tiang Tunggal Pengujian Model II

Pada pengujian model II, model pelat dengan tiang tunggal, dengan dimensi pelat 10 cm x 10 cm, dengan tiang panjang $L=20$ cm. Pembebanan repetitif dengan penambahan beban dan pelepasan beban sampai intensitas beban 200 kg dilakukan pada kondisi tanah awal dan kondisi setelah dibasahi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada tingkat beban yang sama, *displacement* pelat pada kondisi tanah dasar basah lebih besar dibandingkan pada kondisi sebelum dibasahi. Kurva tekanan dan *displacement* pada uji beban langsung, dan uji beban repetitif *loading-unloading* menunjukkan hasil yang hampir sama.

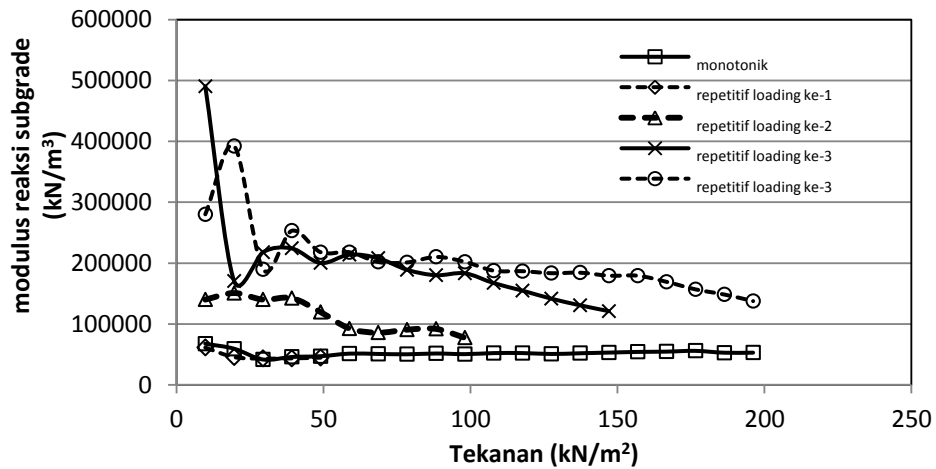
Gambar 5.28 menunjukkan grafik tekanan dan *displacement* dari pengujian pelat dengan tiang tunggal.



Gambar 5.28. Hubungan tekanan dan *displacement* pada uji pembebanan pada kondisi tanah sebelum dibasahi dan setelah dibasahi ($w_o=13,74\%$ dan $w_f=49,19\%$)

Gambar 5.28 menunjukkan bahwa pada pengujian repetitif *loading-unloading*, kemiringan kurva tekanan dan *displacement* pada *loading* kedua, dan ketiga menunjukkan kemiringan kurva tegangan dan *displacement* semakin landai, dibandingkan saat *loading* pertama, artinya modulus reaksi subgrade pada *loading* kedua, dan ketiga semakin besar.

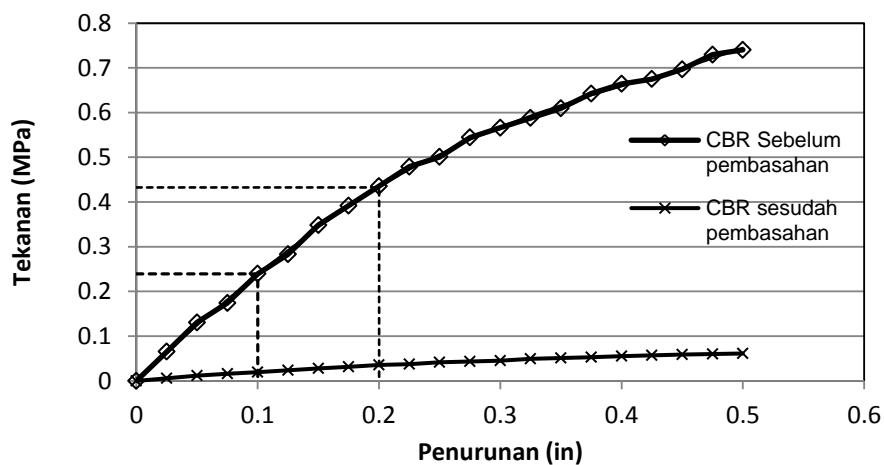
Gambar 5.29 menunjukkan kurva tekanan dan modulus reaksi subgrade pada pembebanan repetitif *loading-unloading* pada kondisi tanah dasar sebelum dibasahi. Pada intensitas tekanan yang sama, *displacement* pada kondisi basah, lebih besar daripada *displacement* yang terjadi pada kondisi sebelum dibasahi. Pada tekanan 200 kN/m², *displacement* yang terjadi pada pembebanan repetitif *loading-unloading*, lebih besar dibandingkan pembebanan menerus tanpa *unloading*. Sama seperti kurva tekanan *displacement* pada kondisi sebelum dibasahi, kurva tekanan dan *displacement* setelah dibasahi memperlihatkan hasil serupa. Kemiringan kurva tekanan-*displacement* lebih landai pada *loading* kedua dan ketiga, artinya modulus reaksi subgrade lebih besar pada *loading* kedua dan ketiga.



Gambar 5.29. Hubungan tekanan dan modulus reaksi subgrade pada pembebanan repetitif *loading-unloading* pada kondisi sebelum dibasahi

7. California Bearing Ratio (CBR) Sebelum dan Setelah Pengembangan

Sebelum pengembangan tanah, dilakukan pengujian CBR lapangan, nilai CBR biasanya digunakan untuk menentukan kekuatan tanah pendukung. Uji CBR lapangan juga dilakukan setelah proses pengembangan selesai dilakukan. Perbandingan nilai CBR sebelum dan setelah pengembangan seperti pada Gambar 5.30. Nilai CBR hasil pengujian seperti dalam Tabel 5.6.



Gambar 5.30. Hasil uji CBR di tempat sebelum dan setelah pembasahan ($w_o=11,21\%$ dan $w_f=47,42\%$)

Setelah pembasahan, nilai CBR tanah turun dengan signifikan. Penurunan kekuatan tanah akibat pembasahan juga telah dijelaskan sebelumnya oleh Sorochan (1991), Aljorany & Noori (2013), Al-Mhaidib & Al-Shamrani (2006) dan masih banyak peneliti-peneliti lainnya. Gambar 5.31 menunjukkan dokumentasi pengujian CBR.

Tabel 5.6. Hasil uji CBR

Pengujian ke	Nilai CBR (%)			
	Kondisi awal		Setelah pembasahan	
	0,1"	0,2"	0,1"	0,2"
1	4,33	5,40	0,29	0,33
2	3,47	4,20	0,36	0,36



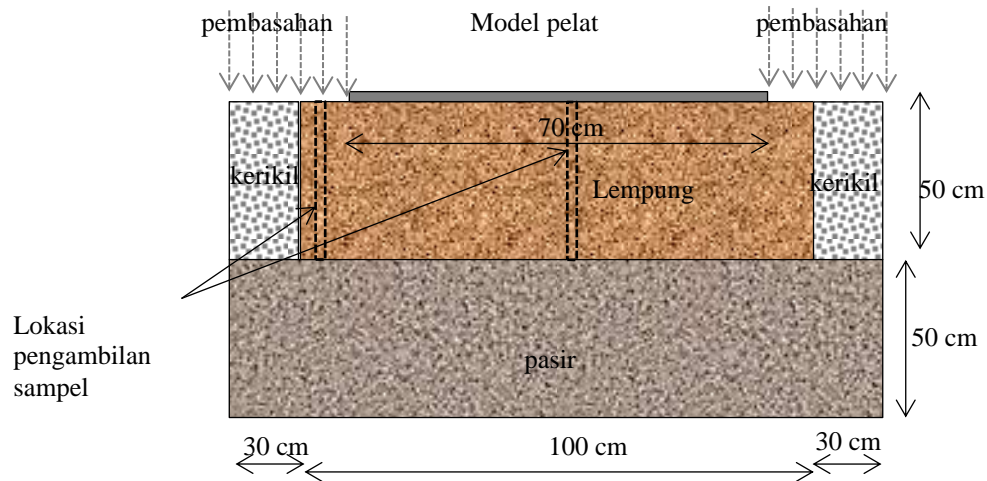
Gambar 5.31. Foto pengujian CBR sebelum pengembangan tanah

8. Profil Kadar Air Sebelum dan Sesudah Pengembangan Pada Pengujian Model I

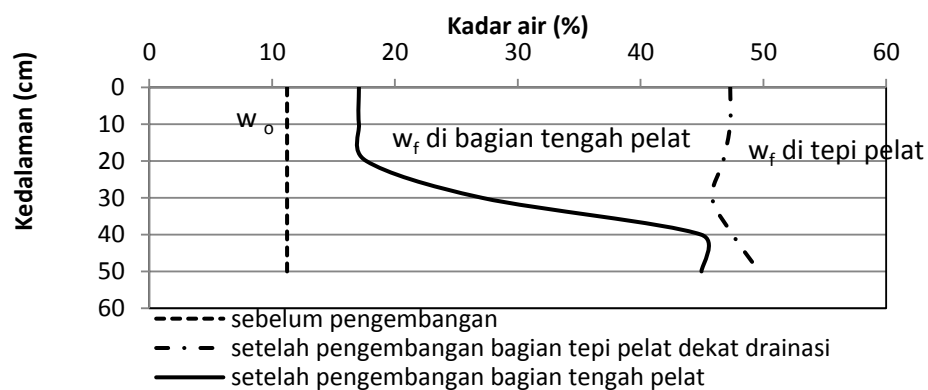
Kadar air diambil dari bagian tengah di bawah model pelat dan dibagian tepi yang berbatasan dengan drainasi. Lokasi pengambilan sampel tanah untuk kadar air seperti pada

Gambar 5.32. Pengambilan sampel tanah untuk pengujian kadar air dilakukan pada setiap kedalaman 10 cm, sampai ketebalan tanah ekspansif (50 cm). Profil

rerata kadar air sebelum dan setelah pengembangan seperti dalam Gambar 5.31. Kadar air tepat di bagian bawah, tengah-tengah pelat terlihat belum menunjukkan perubahan kadar air akhir (w_f) yang signifikan, semakin ke bawah semakin besar, karena lapisan bawah merupakan lapisan pasir, aliran air dari tepi pelat (saluran drainasi/batu pecah) langsung menuju ke lapisan pasir, air dari lapisan pasir kemudian naik ke lapisan lempung melalui mekanisme kapiler, sehingga pada tanah di tengah pelat bagian bawah (yang berbatasan dengan pasir) kadar airnya tinggi. Kadar air di tepi pelat juga terlihat sama dari permukaan sampai ke bawah, karena ada aliran air dari bagian tepi (drainasi) dan dari atas permukaan yang tidak tertutup pelat.



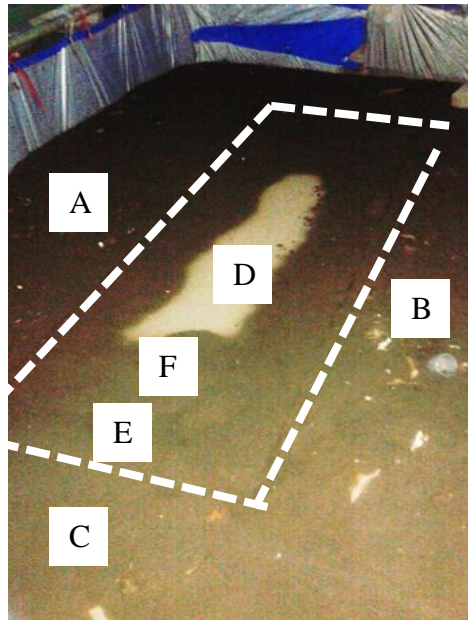
Gambar 5.32. Lokasi pengambilan sampel kadar air



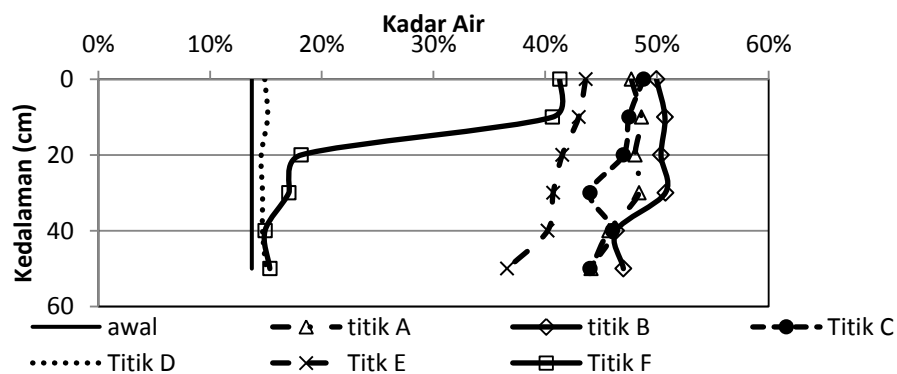
Gambar 5.33. Profil kadar air terhadap kedalaman sebelum dan setelah pembasahan tanah ($w_0=11,21\%$ dan $w_f=47,42\%$)

9. Profil Kadar Air Sebelum dan Sesudah Pengembangan Pada Pengujian Model II

Kadar air awal (w_o) dan kadar air pada akhir pengujian tahap II (w_f) dilakukan pada sejumlah titik-titik tertentu dan sedalam ketebalan tanah ekspansif. Hasil pengujian seperti yang ditampilkan pada Gambar 5.34 dan Gambar 5.35. Pada pengujian Model II, peningkatan kadar air cukup besar, dan pada tepi-tepi pelat perubahan kadar air merata sepanjang ketebalan tanah ekspansif. Hampir serupa dengan pengujian model I, kadar air di tengah-tengah pelat, masih relatif kecil (kering).



Gambar 5.34. Lokasi pengambilan sampel untuk kadar air pada pengujian model II



Gambar 5.35. Profil kadar air pada awal dan akhir pengujian model I

C. Analisis Numeris dengan Plaxis 2 Dimensi

1. Simulasi Numeris untuk Pelat dengan Tiang Tunggal

Analisis numeris dengan elemen hingga menggunakan software Plaxis 2 Dimensi versi 8.2. Sistem pelat terpaku dengan tiang tunggal, dianalisis menggunakan idealisasi *axysimentry*, dengan 15 titik nodal. Model tanah yang digunakan adalah *Hardening Soil (HS)*, sedangkan elemen pelat dan tiang menggunakan elemen linier elastik non porous.

Model *hardening soil* merupakan model tingkat lanjut untuk memodelkan perilaku berbagai jenis tanah, baik untuk tanah lunak maupun tanah keras (Schanz, 1988, dalam Manual Plaxis). Berbeda dengan model elastis-plastis sempurna, bidang leleh dari model hardening plaxis tidak tetap dalam ruangan tegangan utama, tetapi dapat berkembang akibat peregangan plastis. Saat menerima beban deviator utama, tanah umumnya menunjukkan kekakuan yang semakin berkurang dan secara simultan terbentuk regangan plastis yang tidak dapat kembali seperti semula. Model *Hardening Soil* telah jauh melampaui model hiperbolik, karena menggunakan teori plastisitas, bukan elastisitas, telah mengikutsertakan faktor dilatasi tanah, dan dengan digunakannya suatu “cap” leleh (*yield cap*). Karakteristik dari model ini antara lain, kekakuan tergantung pada tegangan secara eksponensial (parameter m), peregangan plastis akibat beban deviator utama (E_{50}^{ref}), peregangan plastis akibat kompresi primer (E_{oed}^{ref}), pengurangan/pemberian beban statis (E_{ur}^{ref} dan v_{ur}), keruntuhan sesuai model Mohr Coulomb (c, ϕ, ψ) (manual Plaxis).

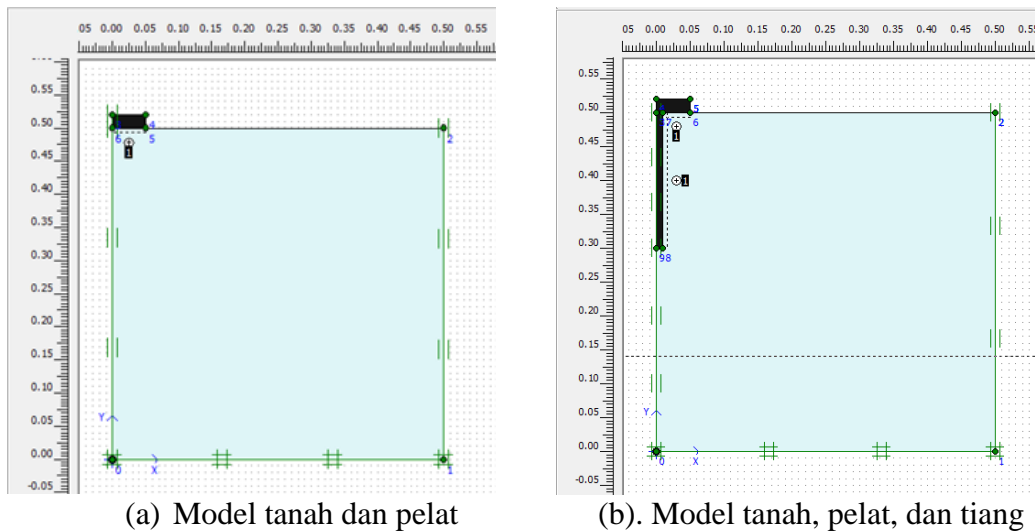
Pada kasus di lapangan pengembangan tanah terjadi akibat perubahan kadar air atau karena pelepasan (pengurangan beban). Sedangkan pada Plaxis dilakukan dengan mengaktifkan Pemodelan pengembangan tanah dilakukan dengan mengaktifkan regangan volume (*volumetric strain*) positif (mengembang). Pada kenyataannya, pengembangan tergantung pada lokasi dari sumber air dan besarnya tekanan *overburden*, untuk penyederhanaan analisis *volumetric strain* diaplikasikan seragam sepanjang ketebalan lapisan tanah ekspansif. Metode

pengaktifan regangan volume digunakan oleh Ismail, (2014), Muntohar, (2014). Data input untuk properties tanah, pelat dan tiang seperti pada Tabel 5.7.

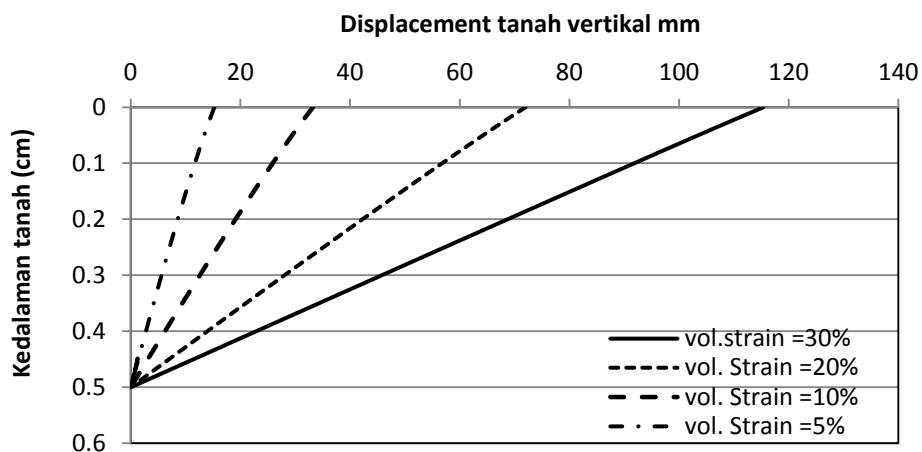
Tabel 5.7. Material untuk model Tanah dan Struktur (pelat dan tiang)

No	Keterangan	Model Tanah	Struktur
1.	Model material	Hardening soil model	Linier elastik
2.	Tipe material	Drained	Non Porous
3.	Unsaturated unit weight γ_{unsat} (kN/m ²)	15	22
4.	saturated unit weight γ_{sat} (kN/m ²)	18.70	-
5.	E_{50}^{ref} (kN/m ²)	6739,70	2500000
6.	E_{oed}	2449,23	-
7.	E_{ur}	20000	-
8.	Kohesi (c) (kN/m ²)	4,00	-
9.	Sudut gesek internal ($^{\circ}$)	30	-
10.	R_{inter}	0,8	-
11.	Kohesi (c) (kN/m ²)	3,82	-
12.	m	1	-

Geometri model seperti pada Gambar 5.36. Karena menggunakan axisimetri, maka hanya setengah bagian saja yang dimodelkan. Sebelum memodelkan pengembangan tanah dan model pelat terpaku dengan satu tiang (*nailed slab*), terlebih dahulu dilakukan simulasi pengembangan tanah saja, tanpa ada struktur (pelat dan tiang). Simulasi pengembangan dilakukan dengan mengaktifkan regangan volume sebesar 5%, 10%, 20%, dan 30%. Hasil simulasi berupa *displacement* sepanjang kedalaman akibat pengembangan seperti pada Gambar 5.37 **Error! Reference source not found.** Setelah itu hasil pengukuran pengembangan tanah (*heave*) di laboratorium untuk setiap kedalaman dibandingkan dengan hasil simulasi numeris dengan Plaxis. Perbandingan antara *heave* hasil pengukuran saat pengujian dengan pengembangan hasil simulasi dengan Plaxis seperti pada Gambar 5.38. Dari Gambar 5.39, diketahui bahwa pola pengembangan (*displacement vertikal*) yang terjadi pada tanah mendekati dengan hasil simulasi Plaxis dengan *volumetric strain*=30%. Untuk simulasi sistem pelat terpaku selanjutnya menggunakan *volumetric strain*=30%



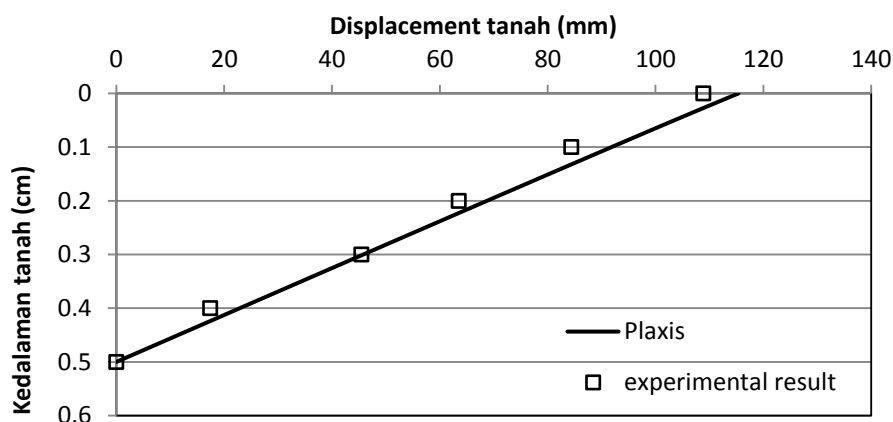
Gambar 5.36. Geometri model



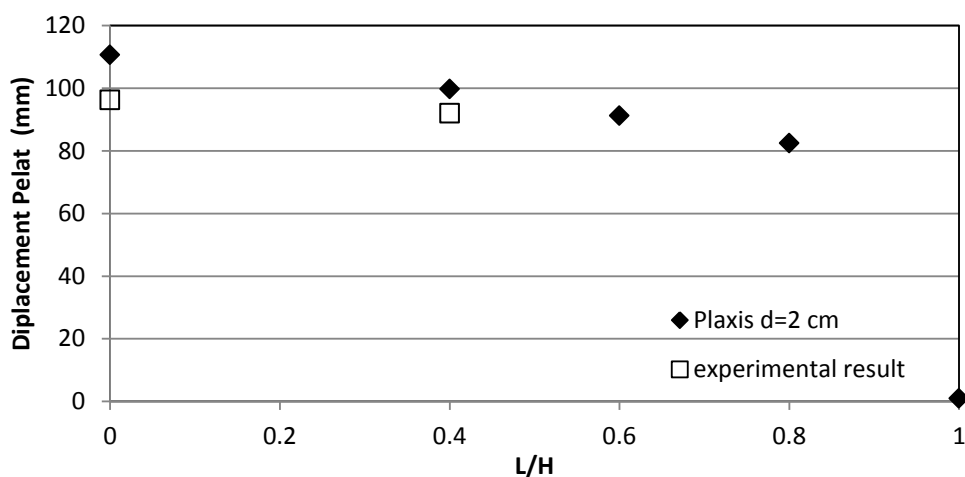
Gambar 5.37. Variasi pengembangan tanah sepanjang kedalaman lapisan tanah ekspansif.

Analisis numeris dengan metode elemen hingga menggunakan *software* Plaxis selanjutnya dilakukan untuk model pengembangan tanah, model pelat dan tanah, dan pelat dengan tiang dengan berbagai variasi panjang tiang, dan diameter dipertahankan konstan yaitu $d=2$ cm. Ketebalan pelat $t=2$ cm, lebar sisi pelat $=10$ cm, variasi panjang tiang $L=20$ cm, 30 cm, 40 cm, dan 50 cm. Ketebalan tanah ekspansif $H=50$ cm. Kemudian hasil simulasi disajikan dalam bentuk rasio panjang tiang dengan kedalaman tanah ekspansif (L/H) dan *displacement* yang

terjadi akibat pengembangan tanah (pada *volumetric strain*=30%) seperti yang terdapat pada Gambar 5.39.



Gambar 5.38. Perbandingan antara hasil pengujian dengan simulasi Plaxis

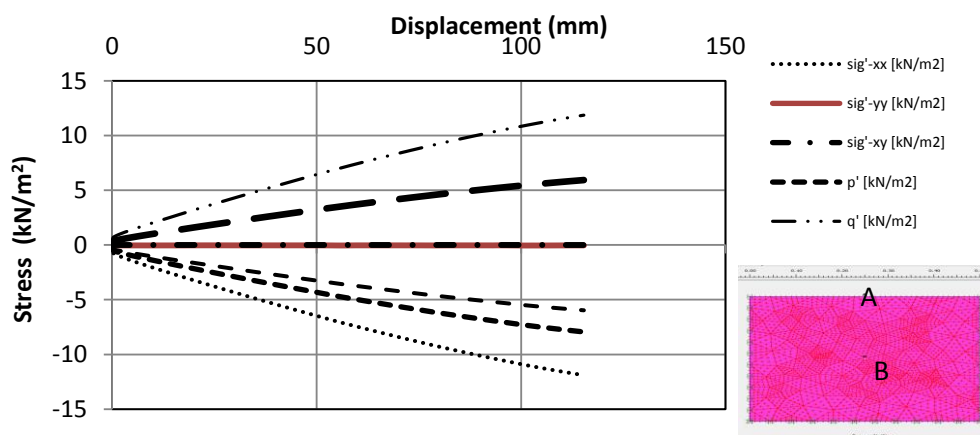


Gambar 5.39. *Displacement* pada pelat akibat pengembangan tanah pada berbagai variasi (L/H)

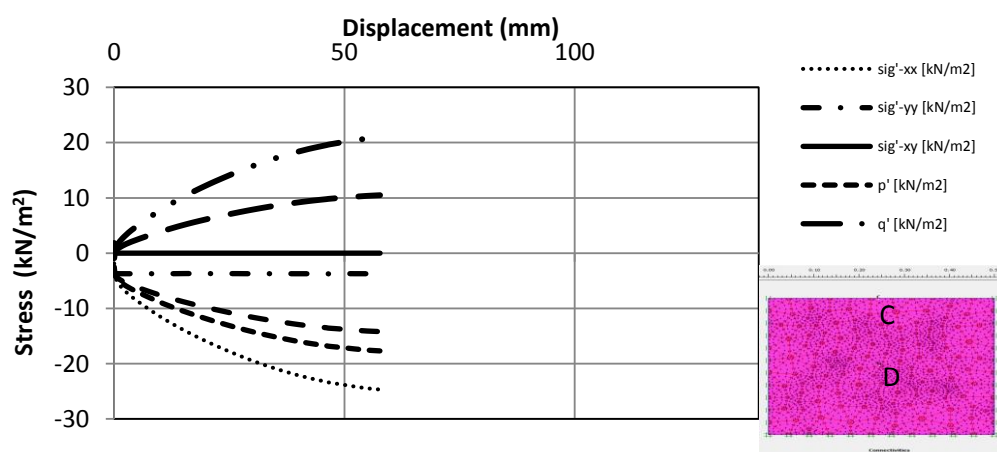
Gambar 5.39 dapat diketahui bahwa hasil simulasi numeris menggunakan Plaxis, mendekati dengan hasil pengujian di laboratorium. Semakin panjang tiang, semakin kecil *displacement* yang terjadi pada pelat. Hasil simulasi menunjukkan pada pelat dengan panjang tiang sama dengan ketebalan tanah ekspansif ($L/H=1$), *displacement* pelat akibat pengembangan tanah sangat kecil.

Gambar 5.40 menunjukkan tegangan-tegangan yang terjadi pada tanah akibat perubahan volume tanah. Gambar 5.40 tersebut menyajikan perubahan

tegangan terhadap perubahan *displacement*. *Displacement* dan tegangan yang terjadi merupakan *displacement* pada titik A dan tegangan pada titik C



Gambar 5.40. Tegangan tanah yang terjadi terhadap perubahan *displacement* vertikal tanah pada titik A



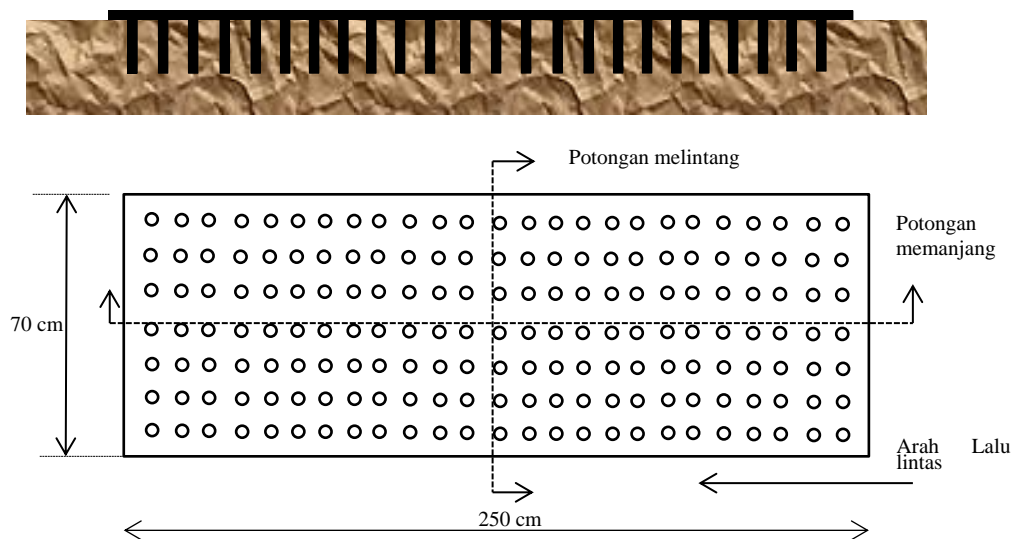
Gambar 5.41. Tegangan tanah yang terjadi terhadap perubahan *displacement* vertikal tanah pada titik B

2. Simulasi Numeris untuk Pelat dengan Kelompok Tiang

Analisis numeris perilaku pelat yang diperkuat kelompok tiang (*nailed slab system*) dilakukan dengan idealisasi sebagai elemen *plane strain*. Model tanah menggunakan *Hardening Soil*, pelat dan tiang sebagai material *plate*. Tinjauan dilakukan pada arah memanjang dan melintang model uji laboratorium, seperti pada Gambar 5.42. Properties tanah, pelat dan tiang seperti ada Tabel 5.7.

Tabel 5.8. Material untuk model tanah dan struktur (pelat dan tiang) pemodelan *plane strain*

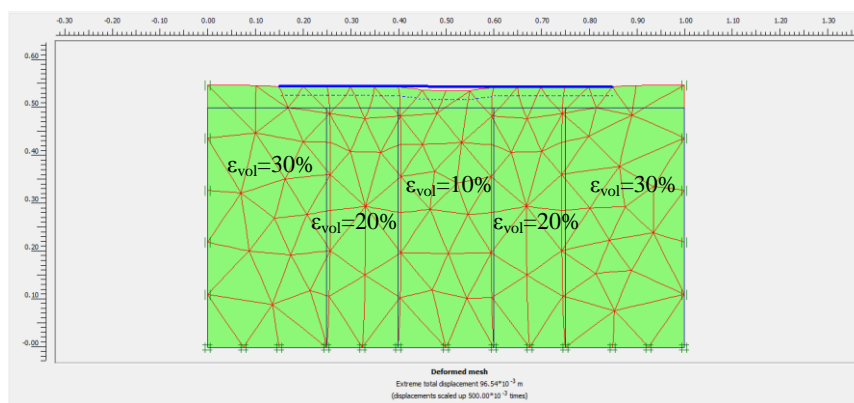
No	Keterangan	Model Tanah	pelat	tiang
1.	Model material	<i>Hardening soil model</i>	<i>plate</i>	<i>plate</i>
2.	Tipe material	Drained	elastik	elastik
3.	Unsaturated unit weight γ_{unsat} (kN/m ²)	15	-	-
4.	saturated unit weight γ_{sat} (kN/m ²)	18.70	-	-
5.	E_{50}^{ref} (kN/m ²)	6739,70	-	-
6.	E_{oed}	2449,25	-	-
7.	E_{ur}	20000	-	-
8.	Kohesi (c) (kN/m ²)	5	-	-
9.	Sudut gesek internal ($^{\circ}$)	30	-	-
10.	R_{inter}	0,8	-	-
12.	EA	-	$1,25 \cdot 10^6$	$8,171 \cdot 10^4$
13.	EI	-	41,667	2,043
14.	v	0,2	0,2	0,2
15.	Weight (w)	0,48	0,48	0,078



Gambar 5.42. Ilustrasi tampak atas model pengujian di laboratorium

a. Analisis arah melintang pelat

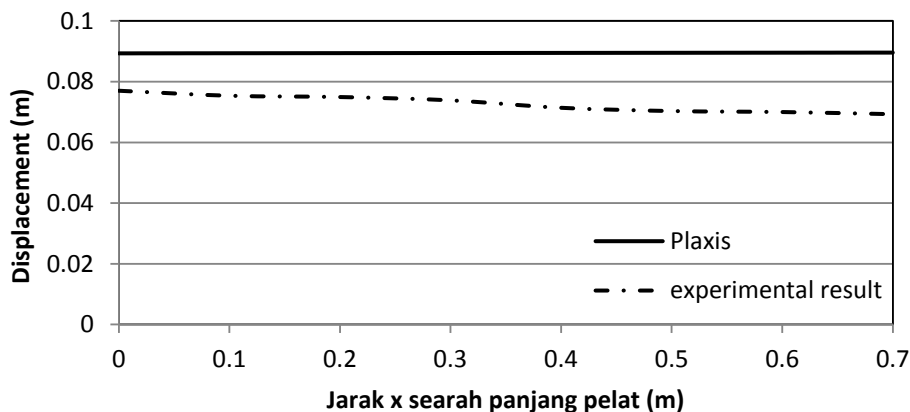
Teori dan pengujian model di laboratorium menunjukkan bahwa, pengembangan dimulai bila terjadi perubahan kadar air. Perubahan kadar air pada model pelat di laboratorium terjadi pada tanah di tepi-tepi pelat, semakin ke bagian tengah, perubahan kadar air akibat pembasahan semakin berkurang, sehingga tanah-tanah dibagian tepi pelat akan mengembang terlebih dahulu. Pada analisis numeris ini, variasi perubahan volume tanah (pengembangan) dimodelkan dengan pengaktifan *volumetric strain* = 30 % di bagian pinggir, kemudian 20%, dan di bagian tengah 10%. Ilustrasi pengembangan dan deformasi tanah setelah terjadi pengembangan seperti pada Gambar 5.43 untuk pelat saja (tanpa perkuatan tiang) arah melintang model. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa, bagian tengah pelat akan terbentuk rongga karena perbedaan pengembangan tanah di bagian tengah dan bagian pinggir-pinggir pelat. Deformasi pelat tidak menunjukkan kelengkungan yang berarti (pelat tidak berbentuk cekung). Hal ini terjadi karena kekakuan pelat relatif besar. Tetapi kondisi ini tidak menguntungkan, karena apabila dibebani, maka hanya pelat yang mendukung beban, tidak disebarkan ke tanah (karena terbentuk rongga di bawah pelat), akibatnya pada tegangan yang terjadi pada pelat akan besar.



Gambar 5.43. Deformasi pelat arah melintang

Perbandingan antara *displacement* pelat hasil analisis numeris dengan *displacement* pelat hasil pengujian di laboratorium seperti pada Gambar 5.44. Dari

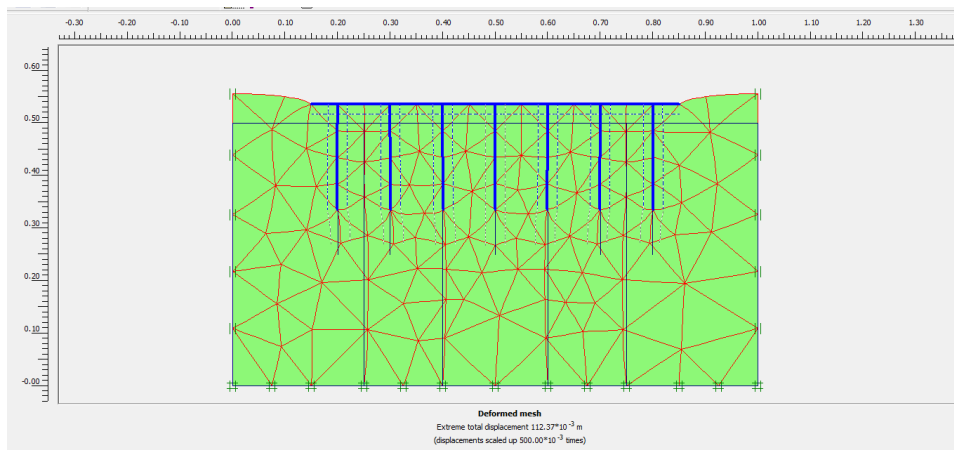
gambar tersebut, diketahui bahwa hasil analisis Plaxis menunjukkan *displacement* yang lebih besar dibandingkan dengan hasil pengujian di laboratorium. Tetapi deformasi pelat yang terbentuk sama, pelat tidak melengkung.



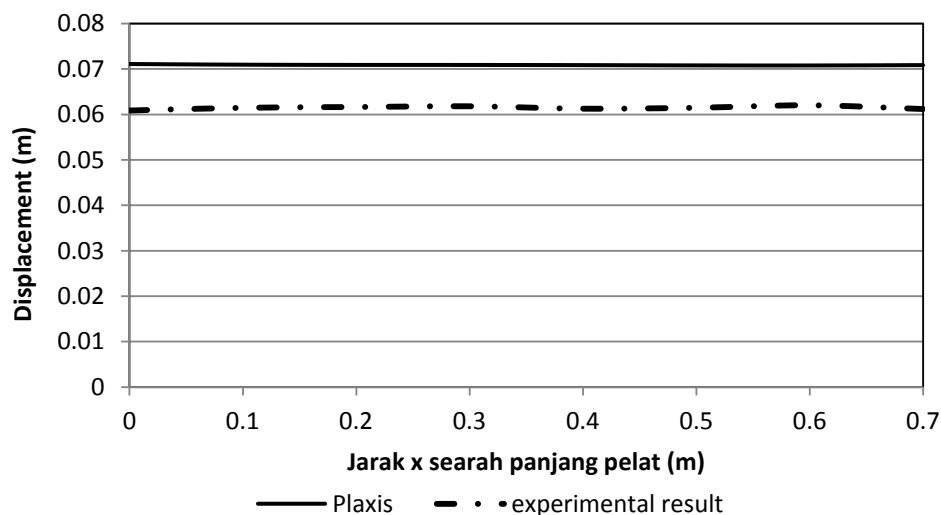
Gambar 5.44. Perbandingan deformasi pelat analisis numeris Plaxis dan hasil pengujian

b. Analisis arah melintang pelat dengan tiang

Pada analisis pelat dengan tiang (sistem pelat terpaku), pola (distribusi) pengembangan tanah di bawah pelat sama seperti pada pelat tanpa tiang. Tujuan dari analisis ini adalah untuk membandingkan perilaku deformasi pelat dan tanah, dengan adanya perkuatan tiang pada pelat, dibandingkan deformasi pelat tanpa tiang. Hasil analisis seperti pada Gambar 5.45, dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa dengan pemasangan tiang, pelat akan selalu kontak dengan tanah. *Displacement* yang terjadi akibat pengembangan tanah juga lebih kecil dibandingkan dengan *displacement* pelat tanpa perkuatan tiang. *Displacement* sistem pelat terpaku hasil analisis lebih besar dibandingkan dengan *displacement* pengujian. Perbandingan hasil analisis dengan hasil pengujian seperti pada Gambar 5.46.



Gambar 5.45. Deformasi sistem pelat terpaku arah melintang

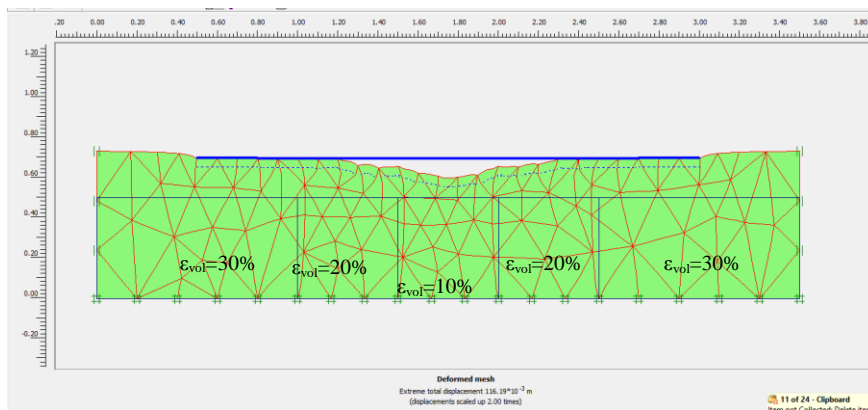


Gambar 5.46. Perbandingan deformasi sistem pelat terpaku dari analisis numeris Plaxis dan hasil pengujian laboratorium

c. Analisis arah memanjang pelat

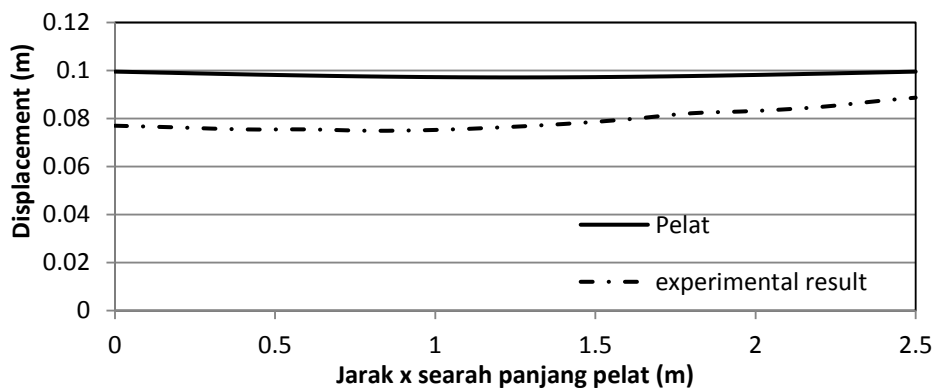
Analisis juga dilakukan untuk meninjau deformasi arah memanjang pelat, prosedur yang digunakan sama seperti analisis pelat akibat pengembangan tanah arah melintang. Deformasi dan persentase pengaktifan *volumetric strain* seperti pada Gambar 5.47. Deformasi pada arah memanjang pelat menunjukkan perilaku yang hampir sama dengan arah melintang. Akibat pengembangan yang tidak seragam, pada bagian tepi pengembangan besar, semakin ke tengah semakin

berkurang, pelat akan terangkat pada kedua tepinya. Karena kekakuan bahan pelat relatif besar, pelat tidak melengkung, tetapi terbentuk rongga antara tanah dan pelat pada bagian tengah pelat. Seperti sebelumnya pada bagian ini beban yang diterima pelat tidak dapat disebarkan langsung ke tanah pendukungnya, akibatnya pelat akan mengalami tegangan yang berlebihan.



Gambar 5.47. Deformasi pelat arah memanjang

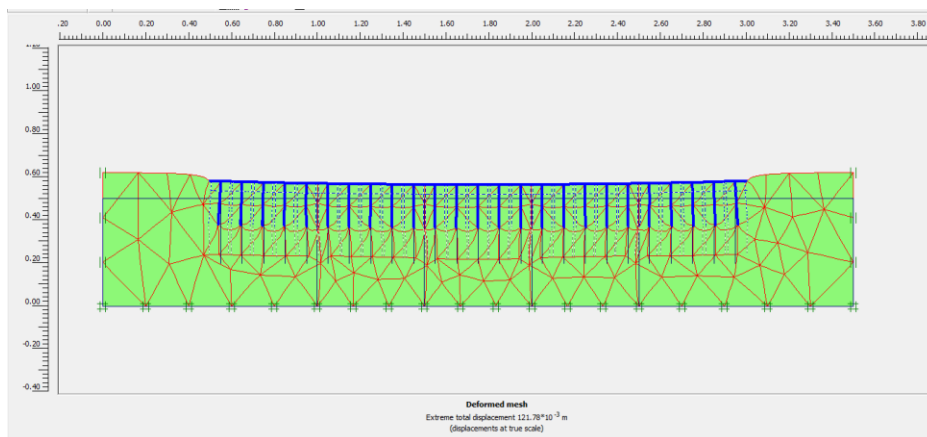
Perbandingan antara hasil analisis dengan hasil pengujian seperti pada Gambar 5.48. Gambar tersebut menunjukkan bahwa hasil analisis dengan Plaxis menunjukkan *displacement* pelat yang lebih besar dibandingkan dengan *displacement* hasil pengujian.



Gambar 5.48. Perbandingan deformasi pelat dan pelat dengan tiang, arah memanjang.

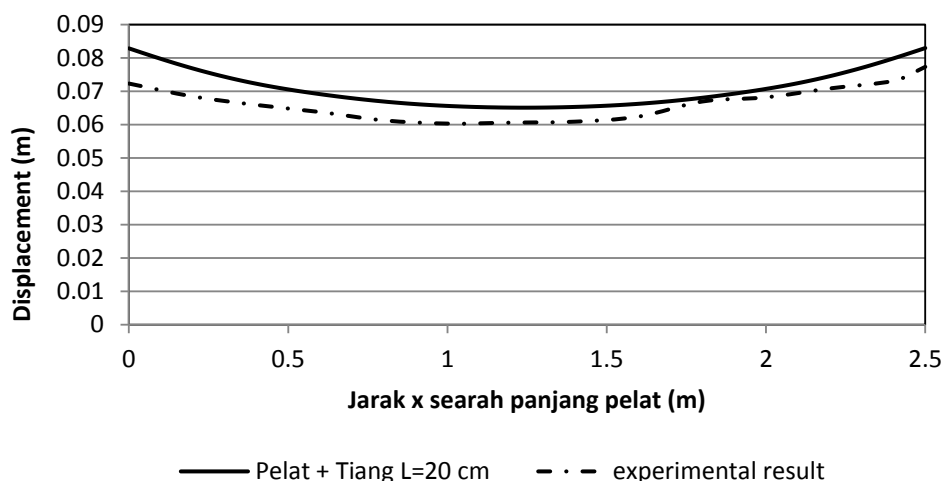
d. Analisis arah memanjang pelat dengan tiang

Pola pengembangan tanah sama seperti pada analisis pelat saja, hasil analisis seperti pada Gambar 5.48. Hasil analisis menunjukkan bahwa dengan penambahan tiang, kontak antara pelat dengan tanah pendukungnya akibat pengembangan tanah yang tidak seragam tetap terjaga. Sehingga beban yang didukung pelat dapat tersalurkan ke tanah dasar.



Gambar 5.49. Deformasi pelat dengan tiang arah memanjang

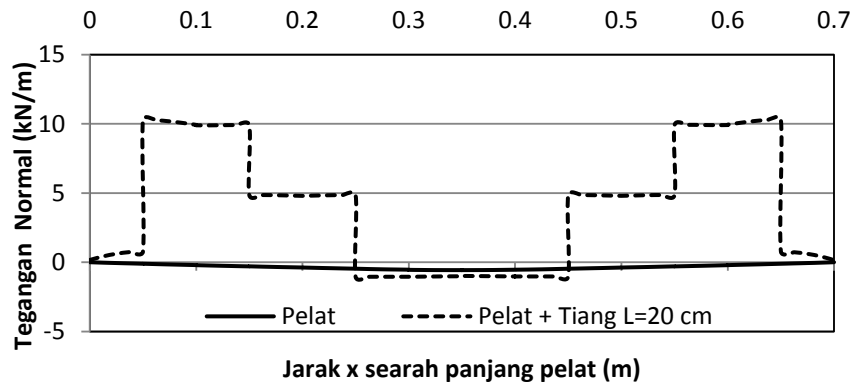
Perbandingan hasil analisis dengan plaxis dengan hasil pengukuran saat pengujian seperti yang ditampilkan Gambar 5.50. *Displacement* hasil analisis numeris dengan plaxis menunjukkan *displacement* yang lebih besar dibandingkan dengan hasil pengujian. Pola deformasi yang ditunjukkan hampir sama, bentuk lengkung dari hasil pengujian dengan analisis hampir sama.



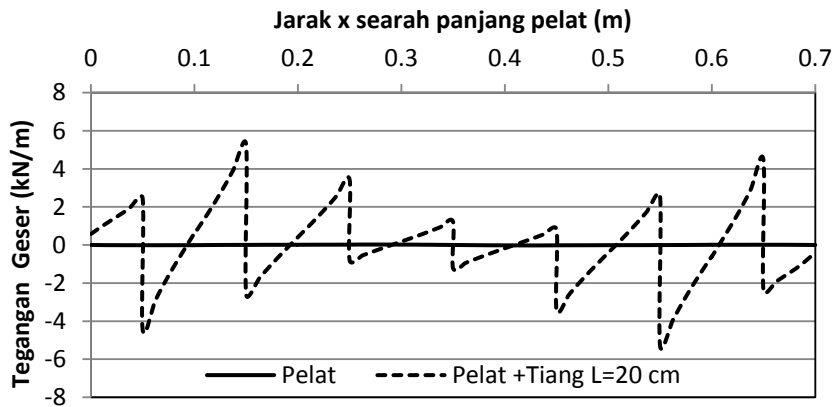
Gambar 5.50. Perbandingan antara analisis Plaxis dengan hasil pengujian pada pelat dengan tiang panjang, $L=20$ cm, $s=10$ cm.

e. Gaya-gaya dalam yang terjadi pada pelat dan tiang akibat mengembangnya tanah dasar.

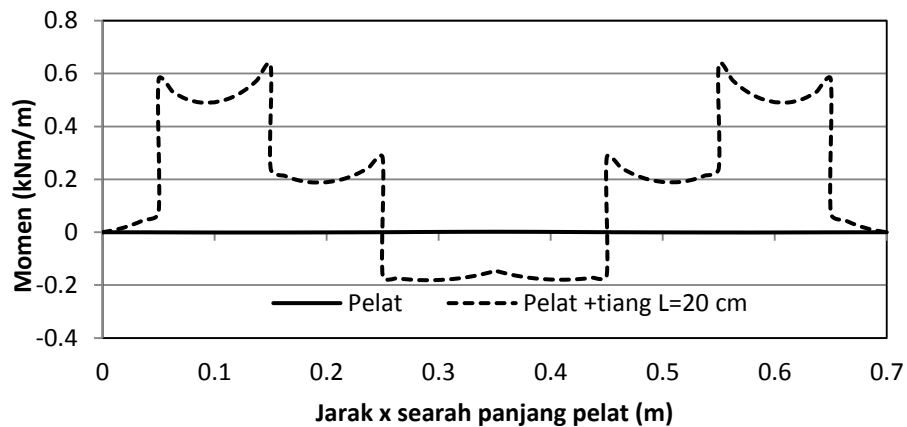
Gambar 5.51, Gambar 5.52, dan Gambar 5.53 menunjukkan gaya-gaya dalam pada pelat akibat reaksi dari pengembangan tanah dasar pada potongan melintang pelat. Dalam gambar-gambar tersebut disajikan perbandingan gaya dalam pada pelat tanpa perkuatan tiang dengan pelat dengan perkuatan tiang (*nailed slab system*). Dari gambar tersebut diketahui, secara umum gaya dalam (*internal forces*) pada sistem pelat terpaku lebih besar dibandingkan dengan struktur pelat saja, sebab akibat pengembangan, tiang-tiang akan memberikan perlawanan gesek, menahan agar pelat tidak terangkat ke atas, akibatnya pelat akan bereaksi, yang ditunjukkan oleh gaya-gaya dalam tersebut.



Gambar 5.51. Perbandingan tegangan normal pada pelat dan pelat dengan tiang (sistem pelat terpaku)



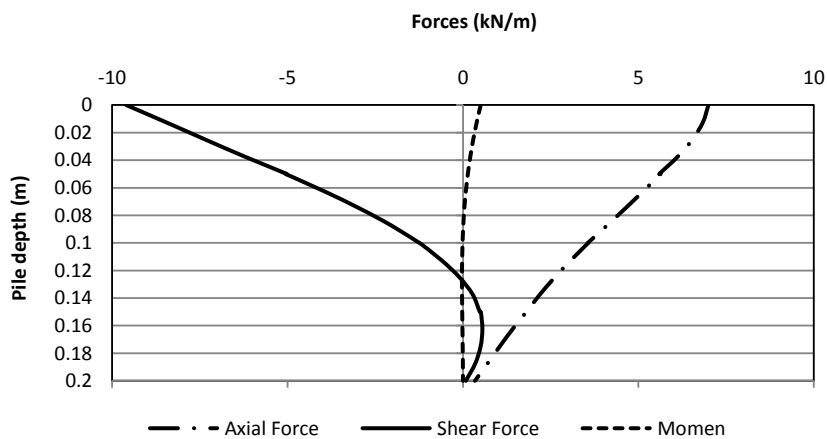
Gambar 5.52. Perbandingan tegangan geser pada pelat dan pelat dengan tiang (sistem pelat terpaku)



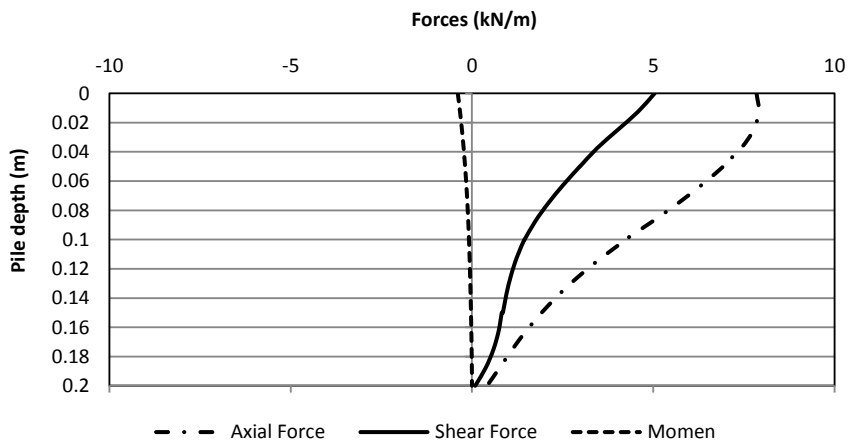
Gambar 5.53. Perbandingan momen pada pelat dan pelat dengan tiang (sistem pelat terpaku)

f. Gaya-gaya Dalam yang Terjadi pada Tiang Mengembangnya Tanah Dasar.

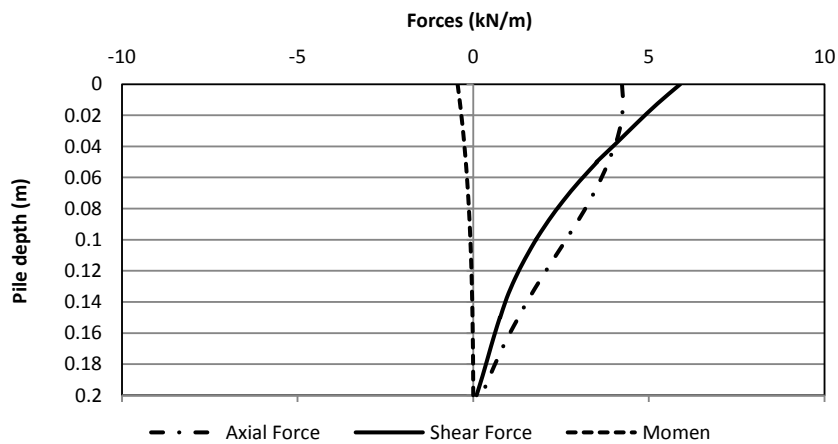
Tegangan yang terjadi pada tiang, seperti tegangan normal, tegangan geser dan momen yang terjadi pada tiang seperti yang ditunjukkan Gambar 5.54, Gambar 5.55, Gambar 5.56, dan Gambar 5.57. Tiang no. 1 adalah tiang yang posisinya di bagian pinggir pelat, tiang no. 4 adalah tiang di bagian tengah pelat, tiang no 2, dan 3 adalah tiang yang berada diantaranya.



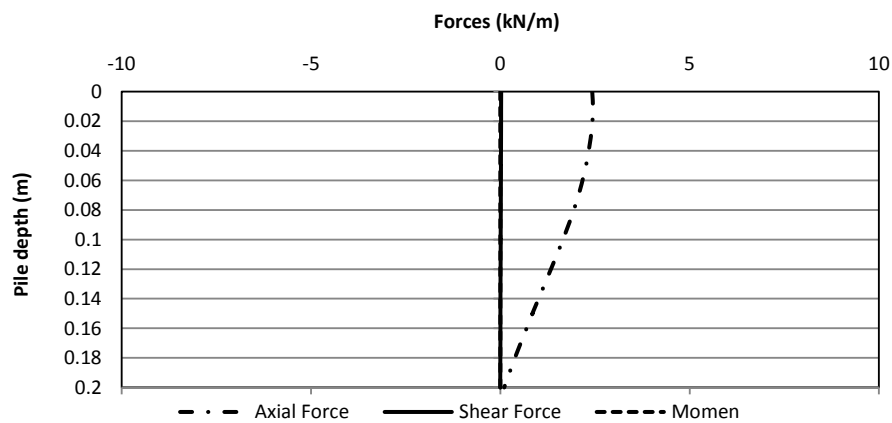
Gambar 5.54. Tegangan-tegangan yang terjadi pada tiang no.1 akibat pengembangan tanah dasar



Gambar 5.55. Tegangan-tegangan yang terjadi pada tiang no.2 akibat pengembangan tanah dasar



Gambar 5.56. Tegangan-tegangan yang terjadi pada tiang no.3 akibat pengembangan tanah dasar



Gambar 5.57. Tegangan-tegangan yang terjadi pada tiang no.4 akibat pengembangan tanah dasar

Dari gambar-gambar tersebut diketahui, tiang pada bagian tepi tegangan-tegangan (tegangan normal, tegangan geser, momen) yang terjadi cukup besar dibandingkan tiang bagian tengah. Tiang-tiang ini menahan deformasi akibat pengembangan tanah yang paling besar.

BAB VI

RENCANA TAHAPAN BERIKUTNYA

Rencana tahapan berikutnya adalah,

1. Penelitian untuk mengetahui kontribusi ikatan antara tiang dan pelat dalam mereduksi kenaikan pelat akibat pengembangan tanah,
2. Memperbaiki analisis numeris dengan menggunakan Plaxis dan melakukan studi parametrik pengaruh panjang dan spasi tiang dengan model numeris

BAB VII

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

1. Pengujian pelat dengan tiang tunggal dalam kolam uji lapangan
 - a. Pelat dengan perkuatan tiang pada tanah ekspansif mengembang menghasilkan *displacement* vertikal yang lebih kecil dibandingkan pelat tanpa tiang. Semakin panjang tiang *displacement* semakin kecil.
 - b. Hasil uji pembebanan pada kondisi awal (kadar air tanah rerata sebesar 11%) menghasilkan modulus reaksi subgrade yang lebih besar dibandingkan kondisi setelah dibasahi (kadar air tanah berkisar 47%).
 - c. Semakin panjang tiang perbedaan modulus reaksi subgrade antara kondisi awal dengan kondisi setelah dibasahi semakin kecil.
2. Pengujian sistem pelat terpaku model I dalam kolam uji lapangan
 - a. Sistem pelat dengan perkuatan tiang (pelat terpaku) menghasilkan *displacement* vertikal akibat pengembangan tanah yang lebih kecil dibandingkan pelat tanpa perkuatan tiang.
 - b. Semakin panjang tiang dan semakin rapat spasi antar tiang, *displacement* yang dihasilkan semakin kecil.
 - c. Pada akhir pengujian didapatkan distribusi kadar air yang belum merata di bawah model pelat, pada bagian tepi pelat kadar air rerata sepanjang kedalaman tanah ekspansif (kedalaman tanah 50 cm) adalah sebesar 47% sampai 49%. Sedangkan dibagian bawah tengah pelat kadar air pada permukaan tanahnya sekitar 17%.
3. Pengujian sistem pelat terpaku model II dalam kolam uji lapangan

- a. *Displacement* pelat pada pengujian model II, rata-rata lebih besar dari pengujian model I. *Heave* tanah dasar mencapai 20% dari ketebalan tanah ekspansif.
- b. Pelat dari bahan fleksiglass, memperlihatkan pola deformasi *edge heave* akibat pengembangan tanah dasar.
- c. Pelat dengan perkuatan tiang mengalami deformasi yang lebih kecil dibandingkan pelat tanpa tiang,
- d. Pemasangan koperan mampu menghambat aliran air menuju tengah pelat dan pelat lebih kaku.

B. Saran

1. Instrumen pengukuran diperbaiki agar hasil pengukuran lebih akurat,
2. Ikatan antara tiang dan pelat diperbaiki dan dipastikan bahwa tiang dan pelat monolit

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelmalak, R., 2007. *Soil Structure Interaction for Shrink-Swell Soils "A New Design Procedure For Foundation Slab on Shrink-Swell Soil"*, Texas: Proquest.
- Adem, H. H. & Vanapalli, S. K., 2013. *A Simple Approach for Predicting Vertical Movements of Expansive Soils Using The Mechanics of Unsaturated Soils*. Paris, www.geotech-fr.org/sites/default/files/congres/cimsg/1069.pdf, pp. 1069-1072.
- Agus, S., Arifin, Y. F., Tripathy, S. & Schanz, T., 2013. Swelling pressure-suction relationship of heavily compacted betonite-sand mixture. *Acta Geotechnica*, pp. 155-165.
- Al-Homoud, A. S., Basma, A. A., Malkawi, A. I. & Bashabsheh, M. A., 1995. Cyclic Swelling Behavior of Clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, pp. 562-565.
- Ali, M. & Ahmed, S. M., 2011. *Micropile Tehnique To Control Heave on Expansive Soil*. Kochi, Indian Geotechnical Society (IGC), pp. 215-218.
- Aljorany, A. N. & Noori, F. S., 2013. Effect of Swelling Soil on Load Carrying Capacity of Single Plie. *Journal of Engineering*, pp. 896-905.
- Al-Mhaidib, A. I., 2006. Swelling behaviour of Expansive Shale. Dalam: *Expansive Soils Recent Advances in Characterization and Treatment*. London: Taylor & Francis, pp. 273-294.
- Al-Mhaidib, A. I. & Al-Shamrani, M. A., 2006. *Influence of Swell on Shear Strength of Expansive Soils*. Shanghai, ASCE, pp. 160-165.
- Alonso, E. E., Gens, A. & Josa, A., 1990. A Constitutive Model for Partially Saturated Soils. *Geotechnique*, pp. 405-430.
- Alonso, E. E., Vaunat, J. & Gens, A., 1999. Modelling the mechanical behaviour of expansive clays. *Engineering Geology*, Volume 54, pp. 173-183.
- Al-shamrani, M. A. & Al-Mhaidib, A. I., 2000. *Swelling Behavior Under Oedometric and Triaxial Loading Condition*. Denver, Colorado, ASCE, pp. 344-360.

- Al-Shamrani, M. A. & Al-Muhaidib, A. I., 2000. *Swelling Behavior Under Oedometric and Triaxial Loading Conditions*. Denver, ASCE, pp. 344-360.
- Al-Shamrani, M. A. & Dhowian, A. W., 2003. Experimental Study of Lateral Restrain Effect on Potential Heave of Expansive Soils. *Engineering Geology*, pp. 63-81.
- Ashayeri, I. & Yasrebi, S., 2009. Free-Swell and Swelling Pressure of Unsaturated Compacted Clays; Experiment and Neural Network Modeling. *Geotechnical Geological Engineering*, Volume 27, pp. 137-153.
- ASTM D 1195, 1993. *Standard Method For Repetitive Static Plate Load Test of Soil and Flexible Pavement Components For Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavement*. West Conshohocken(PA): ASTM.
- ASTM D 3282, 1993. *Standard Practice for Classification of Soils and Soil Aggregate Mixture For Highway Construction Purpose*. West Conshohocken: ASTM.
- ASTM D 3689, 2007. *Standard Test Method For Deep Foundation Under Static Axial Tensile Load*. West Conshohocken(PA): ASTM.
- ASTM D2216, 1998. *Standard Test Methods For Laboratory Determination of Water (moisture) Content of Soil and Rock Mass*. West Conshohocken(PA): ASTM.
- ASTM D2487, 2000. *Standard Practice For Classification of Soils For Engineering Purposes (unified Soil Classification System)*. West Conshohocken(PA): ASTM.
- ASTM D2937, 2000. *Standard Test Method For Density of Soil in Place by The Drive-Cylinder Method*. West Conshohocken(PA): ASTM.
- ASTM D422, 1998. *Standard Test Methods for Particle-size Analysis of Soils*. West Conshohocken(PA): ASTM.
- ASTM D4318, 2000. *Standard Test Methods For Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. West Conshohocken(PA): ASTM.
- ASTM D4546, 2003. *Standard Test Methods For One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils*. West Conshohocken(PA): ASTM.
- ASTM D4767, 2003. *Standard Test Method for unconsolidated Undrained Triaxial Compression Test For Cohesive Soil*. West Conshohocken(PA): ASTM.

- ASTM D5298, 2003. *Standard Test Method For Measurement of Soil Potential (suction) Using Filter Paper*. West Conshohocken(PA): ASTM.
- ASTM D698, 2000. *Standard Test Methods For Laboratory Compaction Characteristic of Soil Using Standard Effort (12400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*. West Conshohocken(PA): ASTM.
- ASTM D854, 2002. *Standard Test Methods For Specific Gravity of Soil Solid by Water Picnometer*. West Conshohocken(PA): ASTM.
- ASTM, 2003. *Standard Test method For Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. West Conshohocken(PA): ASTM.
- Attom, M. F., Zreig, M. M. & Obaidat, M. T., 2006. Effect of Remolding Techniques on Soil Swelling and Shear Strength Properties. Dalam: *Expansive Soil Recent Advances in Characterization and Treatment*. London: Taylor & Francis, pp. 127-138.
- Azam, S., 2006. Large-Scale Oedometer for Assesing Swelling and Consolidation Behaviour of Al-Qatif Clay. Dalam: *Expansive Soils Recent Advances In Characterization and Treatment*. London: Taylor & Francis, pp. 85-99.
- Basma, A. A., Al-Homoud, A. & Husein, A., 1995. Laboratory Assesment of Swelling Pressure of Expansive Soil. *Applied Clay Science*, pp. 355-368.
- Basma, A. A., Al-Homoud, A. S. & Husein, A., 1995. Laboratory Assesment of Swelling Pressure of Expansive Soil. *Applied Clay Science*, pp. 355-368.
- Bendani, K., Missoum, H., Khelafi, H. & Laredj, N., 2008. Modelling the Hydro-Mechanical Behaviour of Highly Expansive Clays. *Asian Journal of Applied Sciences I*, pp. 206-216.
- Bevenga, M. M., 2005. *Pier-Soil Adhesion Factor for Drilled Shaft Piers in Expansive Soils*, Fort Collins: Proquest.
- Binamarga, 2005. *Penanganan Tanah Ekspansif Untuk Konstruksi Jalan*, Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Briaud, J. L., Abdelmalak, R. & Zhang, X., 2012. *Design of Stiffened Slabs-on-Grade on Shrink-Swell Soils*. Barcelona, CRC Press-Balkema-Taylor and Francis Group, pp. 1-22.
- Bryant, J. T., Haque, M. A. & Rosenberk, R. S., 2010. Performance and Design of Slab-on-grade and Pier Foundation System: Theoretical Considerations and Practical Application. *ASCE*, pp. 148-162.

- Bulut, R., 2001. *Finite Element Method Analysis of Slabs On Elastic Half*, Texas: Proquest.
- Chao, K.-C., 2007. *Design Principles For Foundations on Expansive Soils*, Colorado: ProQuest.
- Chao, K. C., Nelson, J. D. & Overton, D. D., 2011. Factors Influencing Design of Deep Foundations on Expansive Soils. Dalam: Jatisankasa, Sawangsuriya, Soralump & Mairaing, penyunt. *Unsaturated Soils: Theory and Practice*. Thailand: Kasetsart University, pp. 829-834.
- Chen, F. H., 1975. *Foundations on Expansive Soils*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers .
- Chen, F. H., 1975. *Foundations On Expansive Soils*. First penyunt. Amsterdam: Elsevier.
- Chiu, C. F., Ni, X. W. & Zhang, L. S., 2014. Effect of Hydraulic Hysteresis ob Shear Strength of Unsaturated clay and its Prediction. *Engineering Geology*, Volume 173, pp. 66-73.
- Cokca, E., Erol, O. & Armangil, F., 2004. Effects of Compaction Moisture Content on Shear Strength of Unsaturated Clay. *Geotechnical and Geological Engineering*, pp. 285-297.
- Cornforth, D. H., 2005. *Lanslide in Practice*. Canada: John Wiley & Sons, Inc..
- Dafalla, M. A., Al-Shamrani, M., Puppala, A. J. & Ali, H. E., 2012. Design Guide for Rigid Foundation System on Expansive Soils. *International Journal of Geomechanics*, pp. 528-536.
- Dafalla, M. A., Shamrani, M. A., Puppala, A. J. & Ali, H. E., 2010. *Use Rigid Foundation System on Expansive Soil*. Orlando, Florida, ASCE, pp. 1680-1689.
- Daffala, M. A., 2012. The influence of Placement Conditions on the Swelling of Variable Clays. *Geotech Geological Engineering*, Volume 30, pp. 1311-1321.
- Daffala, M. A. & Shamrani, M. A., 2011. Road Damage Due to Expansive Soils; Survey of the Phenomenon and Measures for Improvement. *Geotechnical Special Publication No.219 ASCE*, pp. 73-80.
- Day, R. W., 1994. Performance Of Slab-On-Grade- Foundations On Expansive Soil. *Journal Performance Construction Facility ASCE*, pp. 129-138.

- Day, R. W., 1994. Swell-Shrink Behavior of Compacted Clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, pp. 618-623.
- Dessouky, S. H., 2015. *Pavement Repair Long-Term Performance over Expansive Soil*. s.l., ASCE, pp. 380-387.
- Dewi, D. A., 2009. *kajian Pengaruh Tiang Tunggal terhadap Nilai Koefisien Reaksi Subgrade Ekvivalen Pada Uji Beban Skala Penuh*, Yogyakarta: Program Studi Teknik Sipil Program Pascasarjana UGM.
- El-Garhy, B. M. & Wray, W. K., 2004. Method for Calculating the Edge Moisture Variation Distance. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, pp. 945-955.
- Elkady, T. Y. & Abas, M. F., 2012. *Shear Stength Behaviour of Highly Expansive Soil*. Oakland, ASCE, pp. 2532-2541.
- Fan, Z. H., Wang, Y. H., Xiao, H. B. & Zhang, C. S., 2007. Analytical Method of Load Transfer of Single Pile Under Expansive Soil Swelling. *Journal Cent. South Univ. Technology*, pp. 575-579.
- Fityus, S. & Buzzi, O., 2000. The Place of Expansive Clays in The Framework of Unsaturated Soil Mechanics. *Applied Clay Science*, pp. 150-155.
- Fredlund, D. G. & Rahardjo, H., 1993. *Soils Mechanics For Unsaturated Soils*. Canada: John Wiley & Sons, Inc..
- Fredlund, M. D. et al., 2006. *Numerical Modeling of Slab-On-Grade Foundation*. Carefree Arizona, ASCE, pp. 2121-2132.
- Fredlund, M. D. et al., 2006. Numerical Modeling of Slab-On-Grade Foundation. *Unsaturated Soil ASCE*, pp. 2121-2132.
- Gens, A. & Alonso, E. E., 1992. A Framework for Behaviour of Unsaturated Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, pp. 1013-1032.
- Gens, A., Sanchez, M. & Sheng, D., 2006. On Constitutive Modelling of Unsaturated Soils. *Acta Geotechnica*, pp. 137-147.
- Goh, S. C., Rahardjo, H. & Leong, E. C., 2014. Shear Strength of Unsaturated Soils Under Multiple Drying-Wetting Cycles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Issue Technical Note, pp. 06013001-1 - 06013001-5.

- Goh, S. G., Rahardjo, H. & Leong, E. C., 2010. Shear Strength Equations For Unsaturated Soil Under Drying and Wetting. *Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering*, pp. 594-606.
- Grim, R. E., 1968. *Clay Minerology*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Gupta, V., Mishra, A. & Muthukumar, M., 2013. *Behaviuor of Plate Anchors in Expansive Soil*. Roorkee, Indian Geotechnical Society, pp. 1-3.
- Hardiatmo, H. C., 2012. *Tanah Longsor dan Erosi- Kejadian dan Penanganan*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C., 2008b. *Sistem Cakar Ayam Sebagai Alternatif Penanganan Masalah Perkerasan Kaku (Rigid Pavement) Pada Tanah ekspansif*. Yogyakarta, Seminar Nasional Teknologi Tepat Guna Penanganan Sarana Prasarana di Indonesia, pp. F-1 - F-7.
- Hardiyatmo, H. C., 2008. *Sistem "Pelat Terpaku" (Nailed Slab) Untuk Perkuatan Pelat Beton Pada Perkerasan Kaku (Rigid Pavement)*. Yogyakarta, MPSP JTSL FT UGM, pp. M-1 - M-7.
- Hardiyatmo, H. C., 2009. *Metoda Hitungan Lendutan Pelat Dengan Menggunakan Modulus Reaksi Tanah Dasar Ekuivalen Untuk Struktur Pelat Fleksibel*. *Dinamika Teknik Sipil*, pp. 149-154.
- Hardiyatmo, H. C., 2011a. *Perancangan Perkerasan Jalan dan Penyelidikan Tanah*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Pres.
- Hardiyatmo, H. C., 2011b. *Method To Analyze The Deflection of The Nailed Slab System*. *International Journal of Civil & Enviromental Engineering IJCEE-IJENS*, pp. 22-28.
- Hardiyatmo, H. C., 2011c. *Analisis dan Perancangan Fondasi*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C., 2014. *Tanah Ekspansif*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C. & Suhendro, B., 2003. *Fondasi Tiang dengan Pile Cap Tipis Sebagai Alternatif untuk Mengatasi Problem Penurunan Bangunan Di Atas Tanah Lunak*, Yogyakarta: s.n.
- Hashem, M. D. & Abu-Baker, A. M., 2013. Numerical Modelling of Flexible Pavement Constructed on Expansive Soils. *European International Journal of Science and Technology*, 2(10), pp. 19-34.

- Holtz, W. G. & Gibbs, H. J., 1956. Engineering Properties Of Expansive Clays. *Transaction ASCE*, pp. 541-677.
- Houston, W. N. & Nelson, J. D., 2012. *The State of The Practice in Foundation Engineering on Expansive and Collapsible Soil*. Oakland,, ASCE, pp. 608-642.
- Hung, V. Q., 2002. *Uncouple and Coupled Solutions of Volume Change Problems in Expansive Soils*, Saskatoon: ProQuest.
- Ibrahim, S. F. & Aljorany, A. N., 2014. Heave Behaviour of Granular Pile-Anchor Foundation (GPA-Foundation) System in Expansive Soil. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 4(3), pp. 213-222.
- Ismail, A. M. & Shahin, M., 2011. *Finite Element Analysis of Granular Pile Anchors as a Foundation Option for Reactive soils*. Perth, s.n., pp. 1047-1052.
- Ismail, M. A. & Shahin, M. A., 2011. Finite Element Modelling of Innovative Shallow Foundation System of Reactive Soils. *International Journal Of Geomate*, 1(1), pp. 78-82.
- Karnawati, D., 2005. *Bencana Alam Gerakan Massa Tanah di Indonesia dan Upaya Penanggulangannya*. Yogyakarta: Jurusan Teknik Geologi, Universitas Gadjah Mada.
- Kaufmann, K. L., Nielsen, B. N. & Augustesen, A. A., 2010. *Finite Element Investigation on The Interaction between a Pile and Swelling Clay*, Aalborg: Aalborg University.
- Kezhen, Y. & Louceng, W., 2009. *Swelling Behavior of Compacted Expansive Soil*. Hunan, ASCE, pp. 1-6.
- Kezhen, Y. & Luocheng, W., 2009. *Swelling Behavior of Compacted Expansive Soil*. Hunan, s.n., pp. 1-6.
- Lakita, D., 2010. *Uji Beban Pada Sistem Pelat Beton Terpaku dengan Dua Deret Tiang Pada Tanah Lempung*, Yogyakarta: Program Pascasarjana Teknik Sipil dan Lingkungan.
- Liao, Y., Yang, H. & Ni, X., 2011. *Study on Effective Shear Strength of Expansive Rock/Soil of Beijing Western Sixth Ring Highway*. Hunan, ASCE, pp. 93-100.

- Likos, W. J., 2000. *Total Suction-Moisture Content Characteristics For Expansive Soils*, Golden Colorado: Faculty and Board of Trustees of Colorado School of Mines.
- Likos, W. J., 2004. Measurement of Crystalline Swelling in Expansive Clay. *Geotechnical Testing Journal*, pp. 540-546.
- Lin, B. & Cerato, A. B., 2014. *Hysteretic Shear Strength and Shear-induced Volume Change of Natural Expansive Soil Weathered From Shale*. Atlanta, ASCE, pp. 1347-1356.
- Li, X., Wang, M. & Liang, Y., 2011. *Study on Treatment Theory and Technique for Expansive Soil Geological Disaster*. Nanjing, s.n., pp. 802-806.
- Long, X. Y., Aubeny, C. P., Bulut, R. & Lytton, R. L., 2006. Two Dimensional Shrink-Swell Model For Pavement Surface Movement Prediction. *Unsaturated Soil ASCE*, pp. 2150-2161.
- Lu, L., 2010. *A Simple Technique For Estimating The 1-D Heave of Natural Expansive Soils*, Ottawa: ProQuest.
- Lu, N. & Likos, W. J., 2004. *Unsaturated Soil Mechanics*. Nw Jersey: John Wiley and Sons, Inc..
- Masin, D., 2013. Double structure hydromechanical coupling formalism and a model for unsaturated expansive clays. *Engineering Geology*, Volume 165, pp. 73-88.
- Mehmood, E., Ilyas, M. & Farooq, K., 2011. *Effect of Initial Placement Conditions on Swelling Characteristics of Expansive Soils*. Frontiers, ASCE, p. 2397.
- Mochtar, I. B. & Edil, T. B., 1987. Shaft Resistance of Model Pile in Clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, Volume 114, pp. 1227-1244.
- Mohamedzein, Y. E., 2006. Finite Element Analysis of Piers in Expansive Soils. Dalam: *Expansive Soils Recent Advances in Characterization and Treatment*. London: Taylor & Francis Group, pp. 231-243.
- Muntohar, A. S., 2014. *Improvement of Expansive Subgrade Using Column Technique of Carbide Lime and Rice Husk Ash Mixture*. Bandung, s.n., pp. 14-1 - 14-5.
- Musso, G., Vecchia, G. D. & Romero, E., 2013. Modelling the coupled chemo-hydro-mechanical behaviour of structured active clays on basis of

- quantitative microstructural information. *Poromechanics V ASCE*, pp. 1534-1541.
- Muthukumar, M. & Phanikumar, B. R., 2015. Shrinkage Behaviour of GPA-Reinforced Exansive Clay Beds Subjected to Swell-Shrink Cycles. *Geotechnical Geological Engineering*, Volume 33, pp. 475-485.
- Nagaraj, H. B., Munnas, M. M. & Sridharan, A., 2009. Critical Evaluation of Determining Swelling Pressure by Swell-Load Method and Constant Volume Method. *Geotechnical Testing Journal*, Volume 32, pp. 1-10.
- Nasibu, R., 2009. *kajian Modulus Reaksi Tanah Dasar Akibat Pengaruh Tiang (Uji Beban Pada Skala penuh)*, Yogyakarta: Program Studi Teknik Sipil Program Pascasarjana UGM.
- Nelson, J. D., Chao, K. C., Fox, Z. P. & Dunham-Friel, J. S., 2013. *Grouted Micropiles For Foundation Remediation in Expansive Soil*. s.l., s.n., pp. 1-22.
- Nelson, J. D., Chao, K. C., Overton, D. D. & Nelson, E. J., 2015. *Foundation Engineering For Expansive Soil*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Nelson, J. D., Chao, K. C., Overton, D. D. & Nelson, E. J., 2015. *Foundation Engineering For Expansive Soil*. New Jersey: John Wiley & Son.
- Nelson, J. D., Chao, K. C., Overton, D. D. & Schaut, R. W., 2012. Calculation of Heave of Deep Pier Foundations. *Geotechnical Engineering Journal of SEAG & AGSSEA*, pp. 12-25.
- Nelson, J. D., Chao, K.-C., Fox, Z. & Dunham-Friel, J. J., 2013. *Grouted Micropiles For Foundation Remediation in Expansive Soil*. s.l., s.n., pp. 1-22.
- Nelson, J. D., Chao, K.-C. & Overton, D. D., 2007. *Definition of Expansion Potential For Expansif Soil*. Nanjing, The 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils, pp. 597-592.
- Nelson, J. D., Chao, K.-C. & Overton, D. D., 2007. *Design of Pier Foundations On Expansive Soils*. Nanjing China, s.n.
- Nelson, J. D., Chao, K.-c., Overton, D. D. & Dunham-Friel, J., 2011. Evaluation of Level of Risk For Structural Movement Using Expansion Potential. *Geo-Frontiers ASCE*, pp. 2404-2413.
- Nelson, J. D. & Miller, D. J., 1992. *Expansive Soils Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*. Canada: John Wiley & Sons Inc.

- Nelson, J. D., Overton, D. D. & Chao, K.-C., 2006. Evolution of Foundation Design for Expansive Soils. *Geo-volution ASCE*, pp. 62-75.
- Nelson, J. D., Overton, D. D. & Chao, K.-C., 2010. An Empirical Method for Predicting Foundation Heave Rate in Expansive Soil. *Experimental and Applied Modeling of Unsaturated Soils*, pp. 190-196.
- Nelson, J. D., Overton, D. D. & Durkee, D. B., 2001. Depth of Wetting and The Active Zone. *Expansive Clay Soils and vegetative Influence on Shallow Foundation ASCE*, pp. 95-109.
- Nelson, J. D., Reichler, D. K. & Cumbers, J. M., 2006. Parameter for Heave Prediction by Oedometer Test. *Unsaturated Soil*, Volume 147, pp. 951-961.
- Nelson, J. D. et al., 2012. Design Procedure and Considerations for Piers in Expansive Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, pp. 945-956.
- Nusier, O. K. & Alawaneh, A. S., 2004. Micropile Technique to Control Upward Movement of Lightweight Structure Over Expansive Soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, Volume 22, pp. 89-104.
- Oztoprak, S., Sargin, S. & Ozkan, M., 2014. *Mutual Interaction Between Cyclic Swelling-Shrinkage and Structur of Clays*. Shanghai, ASCE, pp. 100-109.
- Phanikumar, B. R., 2009. *Expansive soil*. India, s.n., pp. 907-913.
- Plaxis, 2007. *Plaxis 2D Versi 8*. Delft: Plaxis B.V.
- Plaxis, 2013. *Plaxis 3D Reference Manual*. Delft: Plaxis B.V.
- Poulos, H. G. & Davis, E. H., 1980. *Pile Foundation Analysis And Design*. Canada: John Wiley & Sons, Inc..
- Puppala, A. J., Wattanasanticharoen, E. & Porbaha, A., 2006. Combined Lime and Polypropylene fiber stabilization for modification of expansive soil. Dalam: A. A. Al-Rawas & M. F. Goosen, penyunt. *Expansive Soil Recent advances in characterization and treatment*. London: Taylor & Francis Group, pp. 349-368.
- Puri, A., Hardiyatmo, H. C., Suhendro, B. & Rifa'i, A., 2012a. Determining Additional Modulus of Subgrade Reaction Based on Tolerable Settlement for Nailed-slab System Resting on Soft Clay. *IJCEE-IJENS*, pp. 32-40.
- Puri, A., 2015. *Perilaku Perkerasan Sistem Pelat Terpakai Pada Tanah Dasar Lempung Lunak (soft Clay)*, Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.

- Puri, A., Hardiyatmo, H. C., Suhendro, B. & Rifa'i, A., 2011. *Kontribusi Koperan dalam mereduksi Lendutan Sistem Pelat Terpaku pada Tanah Lempung Lunak*. Jakarta, HATTI, pp. 299-306.
- Puri, A., Hardiyatmo, H. C., Suhendro, B. & Rifa'i, A., 2011. *Studi Eksperimental Defleksi Pelat yang Diperkuat Dengan Tiang-tiang Friksi Pendek pada Tanah Lempung Lunak*. Yogyakarta, HATTI, pp. 317-321.
- Puri, A., Hardiyatmo, H. C., Suhendro, B. & Rifai, A., 2012b. *Application of Additional Modulus of Soft Clay Due To Repetitive Loadings*. Jakarta, HATTI, pp. 217-222.
- Puri, A., Hardiyatmo, H. C., Suhendro, B. & Rifai, A., 2013a. *Pile Spacing and Length Effect Due To The Additional Modulus of Subgrade Reaction of Nailed Slab System on Soft Clay*. Yogyakarta, s.n., pp. 1032-1310.
- Puri, A., Hardiyatmo, H. C., Suhendro, B. & Rifai, A., 2013b. *Deflection Analysis of Nailed-Slab System Which Reinforced by Vertikal Wall Barrier under Repetitive Loadings*. Jakarta, s.n., pp. TS-6-10 - RS6-11.
- Puri, A., Hardiyatmo, H. C., Suhendro, B. & Rifai, A., 2013c. *Behavior of Fullscale Nailed-slab System with Variation on Load Position*. Solo, Universitas Muhammadiyah Solo.
- Puri, A., Hardiyatmo, H. C., Suhendro, B. & Rifa'i, A., 2013d. *Penerapan Metode Analisis Lendutan Pelat Terpaku Pada Model Skala Penuh dan Komparasi dengan Uji Pembebanan*. Surakarta, Universitas Sebelas Maret, pp. G-201 - G-211.
- Puspasari, V., 2013. *Analisis Lendutan, Momen, dan Gaya Lintang pada sistem Pelat Terpaku menggunakan SAP 2000*, Yogyakarta: Program Pascasarjana Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan.
- Rama Rao, R., Rahardjo, H. & Fredlund, D. G., 1998. Closed-Form Heave Solutions For Expansive Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, pp. 573-588.
- Rao, S. M., 2006. Identification and Classification of Expansive Soils. Dalam: *Expansive Soils Recent Advances in Characterization and Treatment*. London: Taylor & Francis, pp. 15-24.
- Rashid, I., Farooq, K., Mujtaba, H. & Khan, A. H., 2013. Treatment of Expansive Clays Throught Compaction Control. *Pakistan Journal of Science*, March, 65(1), pp. 103-107.

- Reed, R. F. & Kelley, M., 2000. Impact Of Climatic Variation On Design Parameters For Slab On Ground Foundations In Expansive Soils. *Advance in Unsaturated Geotechnics*, pp. 435-455.
- Romero, E., 2013. A Microstructural Insight into Compacted Clayey Soils and Their Hydraulic Properties. *Engineering Geology*, Volume 165, pp. 3-19.
- Ryltenius, A., 2011. *FEM Modelling of Piled Raft Foundation in Two and Three Dimention*, Sweden: Geotechnical Engineering.
- Sanjaya, I. M. H., 2014. *Kajian Tahanan Gesek Termobilisasi dan Modulus Reaksi Tanah Dasar Ekuivalen pada Perkerasan Sistem Pelat Terpaku Pada Tanah Pasir*, Yogyakarta: Program Pascasarjana Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan.
- Setiawan, B., Hardiyatmo, H. C., Suhendro, B. & Adi, A. D., 2008. *Uji Pembebanan dan Pengembangan Model Sistem Cakar Ayam Pada Campuran Tanah Lempung Betonite*. Yogyakarta, Seminar Nasional Teknologi Tepat Guna Penanganan Sarana Prasarana di Indonesia, pp. G-1 - G-9.
- Setiawan, B., Hardiyatmo, H. C., Suhendro, B. & Adi, A. D., 2013. *Individual Test Sistem Cakar Ayam Modifikasi (CAM) Pada Tanah Dasar Ekspansif*. Jakarta, HATTI, pp. 91-99.
- Setiawan, Y., Hendrikus, E. L. & Nawir, H., 2013. *Impact of Wetting-Drying Cycles on Shear Strength and Swelling Behavior in Expansive Clay Soils with Various Kaolinite-Montmorillonite Content*. Jakarta, HATTI, pp. 85-90.
- Sharma, R. S. & Phanikumar, B. R., 2005. Laboratory Study of Heave Behavior of Expansive Clay Reinforced with Geopiles. *Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering*, Volume 131, pp. 512-520.
- Smith, D. W., Narsilio, G. A. & Pivonka, P., 2009. Numerical Particel-Scale Study of Swelling Pressure in Clays. *KSCE Journal of Civil Engineering*, pp. 273-279.
- Snethen, D. R. et al., 1975. *A Review of Engineer Experience With Expansive Soils in Highway Subgrade*, Washington DC: Federal Highway Administration.
- Somantri, A. K., 2013. *Kajian Lndutan Sistem Pelat Terpaku pada Tanah Pasir Dengan Menggunakan Metode Beam on Elastic foundation (BoEF) dan Metode Elemen Hingga*, Yogyakarta: Program Pascasarjana Teknik Sipil dan Lingkungan.

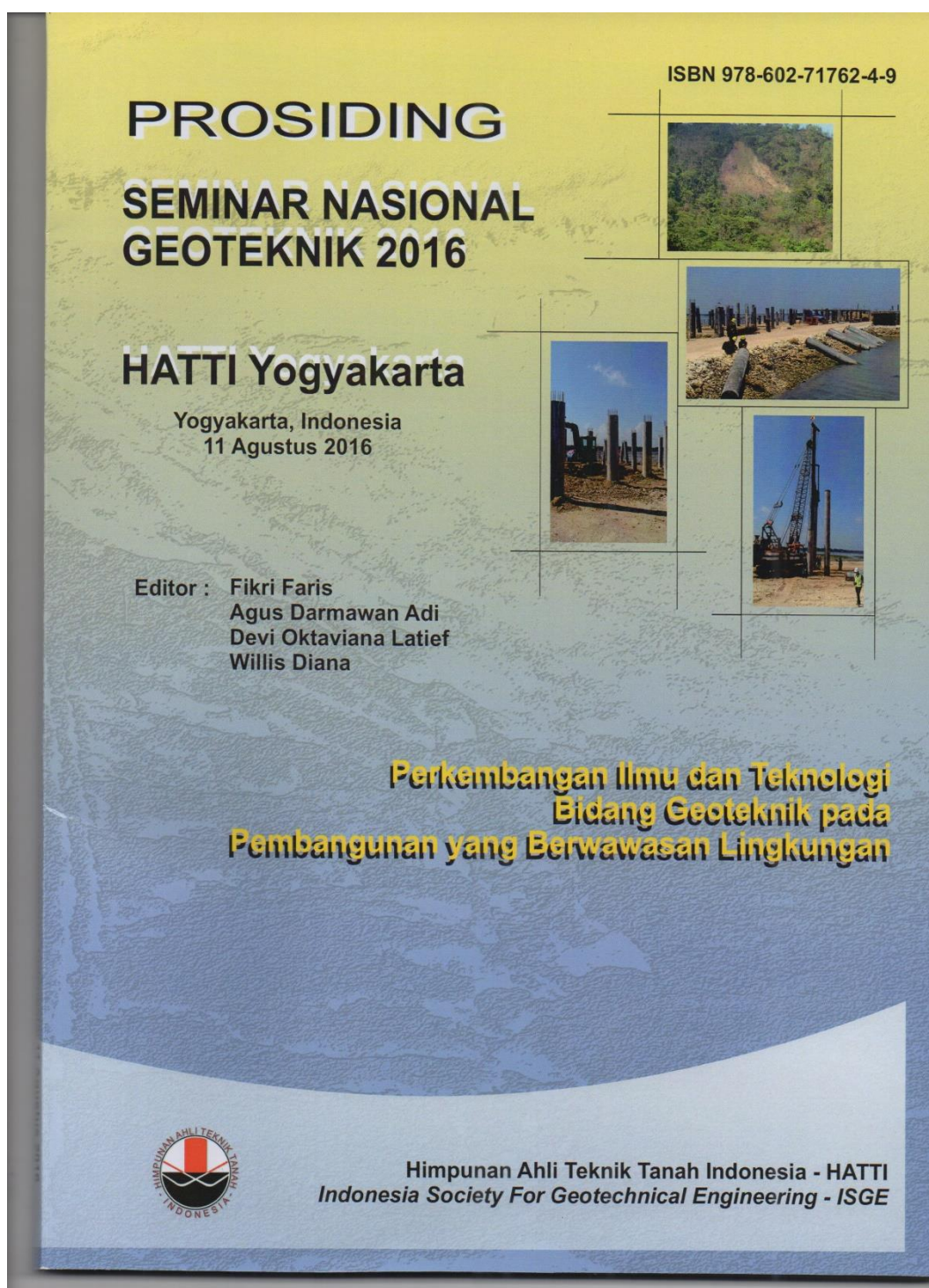
- Sorochan, 1991. *Constructio of Buildings on Expansive Soils*. Brookfield: A.A. Balkema Publishers.
- Sorochan, 1991. *Construction of Buildings on Expansive Soil*. First penyunt. Brookfield: A.A Balkema.
- Sridddharan, A. R. & Sivapullaiah, P. V., 1986. Swelling Pressure of Clays. *Testing Journal Geotechnical*, pp. 24-33.
- Sridharan, A. & Prakash, K., 2000. *Classifikatifion procedures for expansive soils*. London, Telford , pp. 235-240.
- Stavridakis, E., 2006. Stabilization of Problematic Soils Using Cement and Lime. Dalam: A. A. Al-Rawas & M. F. Goosen, penyunt. *Expansive Soils Recent advance in characterization and Treatment*. London: Taylor & Francis Group, pp. 385-398.
- Suhendro, B., 2000. *Teori Model Struktur dan Teknik Instrumentasi*. Yogyakarta: Beta Offset.
- Sun, W., Sun, D. & Li, J., 2010. Elastiplastic Modelling of Hydrolic and Mechanical Behaviour of Unsaturated Expansive Soils. *Experimental and Applied Modelling of Unsaturated Soils*, pp. 119-127.
- Taa, P. D., 2010. *Pengaruh Pemasangan Kelompok Tiang Terhadap Kenaikan Pelat dalam Sistem Nailed Slab yang Terletak di Atas Tanah Dasar Ekspansif*, Yogyakarta: Program Studi Teknik Sipil Program Pascasarjana UGM.
- Thompson, R. W., Perko, H. A. & Rethamel, W. D., 2006. Comparison of Constant Volume Swell Pressure and Oedometer Load-Back Pressure. *Unsaturated Soil*, pp. 1787-1998.
- Tiwari, B., Ajmera, B. & Kaya, G., 2010. *Shear Strength Reduction at Soil Structure Interface*. Florida, ASCE, pp. 1747-1756.
- Togubu, j., 2012. *Kajian Kenaikan Modulus Reaksi Subgrade dari Uji Beban Pelat yang Didukung Tiang Pada Sistem Pelat Terpaku*, Yogyakarta: Program Pascasarjana Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan.
- Tonoz, M. C., Gokceoglu, C. & Ulusay, R., 2006. Stabilization of expansive Ankara Clay with Lime. Dalam: A. A. Al-Rawas & M. A. Goosen, penyunt. *Expansive Soils Recent advance in characterization and treatment*. London: Taylor & Francis Group, pp. 317-340.

- Tripathy, S. & Rao, K. S., 2009. Cyclic Swell-Shrink Behaviour of Compacted Expansive Soil. *Geotechnical Geological Engineering*, pp. 89-103.
- Vanapalli, S. K. & Adem, H. H., 2013. A simple Modelling Approach For Estimation of Soil Deformation Behaviour of Natural Expansive Soils Using The Modulus of Elasticity as a Tool. *Poromechanics V ASCE*, pp. 1695-1704.
- Villar, M. V. & Lloret, A., 2008. Influence of Dry Density and Water Content on Swelling of a compacted bentonite. *Applied Clay Science, ScienceDirect*, Volume 39, pp. 38-49.
- Villar, M. V. & Lloret, A., 2008. Influence of Dry density and Water Content on The Swelling of a Compacted Bentonite. *Applied Clay Science*, pp. 38-49.
- Vu, H. Q. & Fredlund, D. G., 2006. Challenges to modelling heave in expansive soil. *Canada Geotechnical Journal*, pp. 1249-1272.
- Wang, Q., Tang, A. M., Cui, Y. & Gatmiri, B., 2012. Experimental study on the swelling behavior of bentonite/claystone mixture. *Engineering Geology*, Volume 124, pp. 59-66.
- Wang, Q., Tang, A. M., Cui, Y. J. & Delage, P., 2012. Experimental Study on The Swelling Behaviour of Bentonite/Claystone Mixture. *Engineering Geology*, pp. 59-66.
- Wayllace, A., 2008. *Volume Change and Swelling Pressure of Expansive Clay in The Crystalline Swelling Regime*, Ann Arbor: UMI Dissertation Publishing copyright by ProQuest.
- Wood, D. M., 2004. *Geotechnical Modelling*. New York: Taylor & Francis.
- Xiao, H. B., Zhang, C. S., Wang, Y. H. & Fan, Z. H., 2011. Pile-Soil Interaction in Expansive Soil Foundation: Analytical Solution and Numerical Simulation. *International Journal Of Geomechanics ASCE*, pp. 159-166.
- Xie, M., Wang, W., Jonge, J. D. & Kolditz, O., 2007. Numerical Modelling of Swelling Pressure in Unsaturated Expansive Elasto-Plastic Porous Media. *Transport in Porous Media*, pp. 311-339.
- Xu, K. J. & Poulos, H. G., 2001. 3-D Elastic Analysis of Vertical Piles Subjected to "Passive" Loading. *Computers and Geotechnics*, Volume 28, pp. 349-375.
- Xungou, Z., 2011. *Research on the Characteristics of Swelling Force of Unsaturated Swelling Rock and Soil*. Lushan, s.n., pp. 620-625.

- Zhang, C. S., Wang, Y. H., Xiao, H. B. & Fan, Z. H., 2009. Numerical Simulation of Soil-Pile Interaction in Expansive Soils Foundation. *Soil and Rock Instrumentation, Behaviour, and Modelling ASCE*, pp. 99-105.
- Zhang, R., Yang, H. & Zheng, J., 2006. *The Effect of Vertical Pressure on the Deformation and Strength of Expansive Soil During Cyclic Wetting and Drying*. Carefree, ASCE, pp. 894-905.
- Zhang, X., 2004. *Consolidation Theories for Saturated-Unsaturated Soil and Numerical simulation of Residential Building on Expansive Soils*, Texas: Proquest.
- Zhang, X. & Briaud, J.-L., 2006. *Couple water content method for shrink and swell prediction*, Washington: Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting.
- Zhang, X. & Liu, J., 2008. Numerical Simulation of Influence of Climate Factors on Concrete Pavements Built on Expansive Soil. *GeoCongress ASCE*, pp. 554-561.
- Zhang, Z., Tao, M. & Tumay, M. T., 2009. *Swelling behavior of Compacted Cohesive Soil-An Absorbed Energy Approach*. Hunan, ASCE, pp. 20-25.
- Zhou, C. H. & Keeling, J., 2013. Fundamental and Applied Research on Clay Mineral: From Climate and Enviroment to Nanotechnology. *Applied Clay Science*, Volume 74, pp. 3-9.

LAMPIRAN

PUBLIKASI SEMINAR NASIONAL



PROSIDING**SEMINAR NASIONAL GEOTEKNIK 2016****Editor**

Fikri Faris

Agus Darmawan Adi

Devi Oktaviana Latief

Wilis Diana

Reviewer

Prof. Hary Christady Hardiyatmo

Muhammad Yamin

Devi Oktaviana Latief

Wilis Diana

Indriati M. Patuti

I Nengah Sinarta

Adzoki Waruwu

Muhajirah

Sriyati Ramadhani

ISBN 978-602-71762-4-9

Penerbit:

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan
Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No.2 Yogyakarta 55284
Tel. (0274) 545675



Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia
Basement Aldevco Octagon
Jl. Warung Jati Barat Raya No. 75
Jakarta 12740 Tel. (021) 7981966

Pemodelan Skala Kecil dan Analisis Numeris Sistem Pelat Terpaku Pada Tanah Ekspansif

Willis Diana

Kandidat doktor, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, UGM

Hary Christady Hardiyatmo

Profesor, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, UGM

Bambang Suhendro

Profesor, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, UGM

ABSTRAK: Tanah ekspansif merupakan salah satu penyebab paling sering kerusakan perkerasan jalan. Fluktuasi kadar air menyebabkan tanah mengalami pengembangan dan penyusutan yang mengganggu kestabilan dan unjuk kerja perkerasan. Tiang telah umum digunakan untuk mereduksi pengangkatan pelat yang diakibatkan pengembangan tanah ekspansif. Ide utama penelitian ini adalah untuk menyelidiki perilaku pelat dengan kekuatan tiang, atau yang disebut dengan sistem pelat terpaku, sebagai alternatif sistem perkerasan kaku pada tanah dasar ekspansif. Pengujian skala kecil perilaku model sistem pelat terpaku pada tanah ekspansif dengan variasi kekakuan pelat dan penggunaan koperan telah dilakukan. Hasil pengukuran *displacement* pelat akibat pengembangan tanah di laboratorium dicatat dan kemudian dibandingkan dengan analisis metode elemen hingga menggunakan Plaxis. Pada simulasi numeris dengan plaxis, tanah dimodelkan dengan pengembangan volume 30%. Hasil pengujian menunjukkan tiang-tiang pada sistem pelat terpaku mampu mereduksi *displacement* pelat dan membuat pelat tetap kontak dengan tanah. Kurvadeformasi sistem pelat terpaku akibat pengembangan tanah dipengaruhi pada derajat kekakuan pelat. Hasil analisis numeris menunjukkan kecocokan dengan hasil pengujian di laboratorium.

Kata Kunci: tanah ekspansif, *nail slab system*, model skala kecil, metode elemen hingga

ABSTRACT: The expansive soil is considered one of the most common causes of pavement distresses. Therefore, the expansive soil undergoes swelling and shrinking caused by moisture fluctuation. Ordinarily, piles have been used extensively for a foundation in swelling soil to reduce plate uplift movement caused by swelling of expansive soil. Moreover, the main idea of this study was to examine the behaviour of pile reinforced plate that called nailed slab system to control plate uplift movement. The small scale experimental investigation of nail slab system with a variety in the plate stiffness and the used of the vertical barrier has been made and compared with the result from finite element numerical analysis by using Plaxis. The soil was modeled to have about 30% swelling in Plaxis. The result indicated that the piles were functioning as heave reduction. Furthermore, mound profile of the plate depends on the degree of plate flexibility. The experimental result indicated in a good agreement with the numerical simulation by using Plaxis.

Keywords: expansive soil, nail slab system, small scale model, finite element method

1 PENDAHULUAN

Tanah lempung ekspansif merupakan salah satu penyebab paling sering kerusakan perkerasan jalan. Perubahan kadar air yang disebabkan oleh perubahan musim menyebabkan tanah lempung mengalami perubahan volume yang akan memicu kerusakan struktur. Terlebih struktur perkerasan yang merupakan struktur yang ringan dan bentangnya luas. Kerusakan perkerasan yang sering ditemui seperti retak,

patah, dan bergelombangnya struktur perkerasan. Berbagai cara untuk mencegah dan mengatasi permasalahan yang timbul pada tanah ekspansif, salah satunya dengan memberikan kekuatan pada pelat perkerasan dengan menggunakan kekuatan vertikal, yang mampu mereduksi pergerakan vertikal pelat akibat mengembangnya tanah dasar.

Macam kekuatan vertikal yang telah dilakukan antara lain dengan menggunakan kolom batu berangker (Ibrahim & Aljorany, 2014), *micropile* (Nusier & Alawaneh, 2004),

geopile (Sharma & Phanikumar, 2005), kolom kapur (Muntohar, 2016; Tono dkk, 2006), tiang pancang dan tiang bor (Sorochan, 1991), cakar ayam dan cakar ayam modifikasi (Hardiyatmo, 2008a). Setiap metode memiliki keunggulan dan kekurangan dilihat dari segi teknis pelaksanaan di lapangan, material, biaya dan kesesuaian dengan sumber daya dan keadaan setempat, sehingga metode-metode untuk mereduksi kerusakan struktur akibat pengembangan tanah ekspansif terus berkembang.

Selain pemodelan di laboratorium, dan aplikasi langsung di lapangan, analisis numeris metode perkuatan struktur pada tanah ekspansif dengan menggunakan tiang telah banyak dilakukan para peneliti dan berbagai formula perancangan tiang pada tanah ekspansif banyak diusulkan seperti Sorochan (1991), Nusier & Alawaneh (2004), Mohamedzein (2006), Zhang, dkk (2009), Nelson, dkk (2015). Metode-metode tersebut umumnya digunakan untuk analisis tiang tunggal, dan bukan sebagai sistem kelompok tiang, dan terkadang cukup sulit memperoleh dan menentukan input parameter dalam penggunaan formula-formula tersebut. Pemodelan numeris dengan metode elemen hingga menggunakan *software* Plaxis untuk memodelkan tiang pada tanah ekspansif telah dilakukan oleh beberapa peneliti seperti Kaufmann dkk (2010), yang memodelkan pengembangan tanah dengan pelepasan beban (*unloading*), Hashem & Abu-Baker (2013), Ismail & Shahin (2011), dan Muntohar (2016) memodelkan pengembangan dengan mengaktifkan parameter regangan volumetrik tanah.

Ide utama penelitian ini adalah untuk menyelidiki perilaku pelat dengan perkuatan tiang-tiang, atau yang disebut dengan sistem pelat terpaku, sebagai alternatif sistem perkerasan kaku pada tanah dasar ekspansif. Untuk memahami beberapa aspek fisik dari prototipe model sistem pelat terpaku ini, telah dilakukan pemodelan fisik skala kecil (perbandingan model terhadap prototipe 1:10), dengan maksud untuk memperoleh beberapa informasi respon pola perilaku yang diharapkan, secara lebih cepat dengan kontrol detail yang lebih teliti. Pada penelitian ini, variasi kekakuan pelat dan penggunaan koperan telah dilakukan. Variasi bahan pelat meliputi, pelat dari mortar semen dan pelat fleksiglass untuk memodelkan pelat dengan kekakuan yang lebih rendah (fleksibel). Selain

itu, juga telah dilakukan analisis numeris dengan metode elemen hingga menggunakan Plaxis, untuk mengetahui kesesuaian antara hasil pengukuran di laboratorium dengan analisis numeris, dan kemungkinan penggunaan metode numeris ini untuk lebih mengeksplorasi sistem pelat terpaku sehingga penentuan parameter-parameter kontrol yang mempengaruhi perilaku sistem ini bisa dilakukan lebih cepat.

Sistem pelat terpaku pertama kali diusulkan oleh Hardiyatmo (2008b), sebagai upaya untuk mengatasi masalah perkerasan pada tanah yang tidak stabil seperti tanah lempung lunak dan tanah ekspansif. Sistem perkerasan ini berupa pelat perkerasan beton bertulang (dengan ketebalan 12 cm-20 cm) yang didukung dengan tiang-tiang mini di bawahnya dengan diameter 15 cm-20 cm dan panjang 150 cm – 200 cm. Fungsi tiang-tiang pada sistem pelat terpaku antara lain untuk, meningkatkan daya dukung tanah dasar (menambah modulus reaksi subgrade), menjaga agar pelat beton tetap kontak dengan lapis pondasi bawah dan atau tanah dasar di bawahnya, sehingga mencegah timbulnya rongga-rongga di bawah struktur perkerasan, ketidakrataan pelat akibat gerakan tanah di bawahnya dapat direduksi, dengan termobilisasinya tahanan gesek selimut tiang dan berat sendiri tiang (Hardiyatmo, 2011). Sistem pelat terpaku (*nailed slab system*), merupakan salah satu sistem yang memandang perkuatan tiang pada pelat sebagai satu kesatuan. Penggunaan tiang dapat meningkatkan modulus reaksi subgrade tanah dasar (Puri, 2015) dan tiang dan pelat di buat monolit sehingga ada interaksi saling mempengaruhi antara tanah, tiang dan pelat dalam mendukung beban luar. Hasil penelitian sistem pelat terpaku pada tanah ekspansif yang dilakukan Diana, dkk (2016) menunjukkan bahwa dengan perkuatan tiang, *displacement* pelat akibat mengembangnya tanah lebih kecil dibandingkan pelat tanpa perkuatan tiang, tiang yang lebih panjang mampu mereduksi kenaikan pelat lebih besar.

2. PENGUJIAN LABORATORIUM

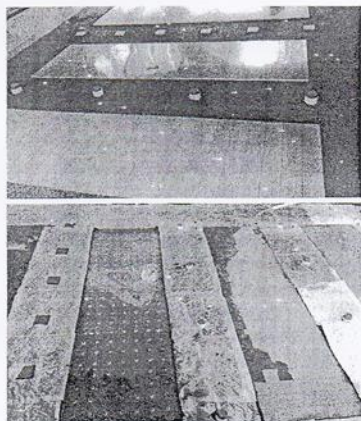
2.1 Bahan Penelitian dan Pengujian

Tanah ekspansif yang digunakan adalah tanah lempung yang berasal dari Ngawi. Tanah diambil pada kedalaman 1 m sampai 2 m dari permukaan tanah, berupa sampel terganggu

(*disturbed*). Sifat fisik tanah seperti dalam Tabel 1.

Tanah dikeringkan, dihaluskan dan disaring sehingga lolos saringan no.4, kemudian dipadatkan dalam kolam pengujian berukuran 350 cm x 700 cm x 100 cm setebal 50 cm. Kadar air awal tanah dalam kolam pengujian sekitar 11 %.

Tiang dan pelat dibuat dari mortar semen, dengan kekuatan kawat galvanis berdiameter 2 mm. Pelat menggunakan kekuatan kawat anyam (*wiremesh*) dengan diameter kawat 1-2 mm. Tiang yang digunakan berdiameter 2 cm, panjang 20 cm. Sedangkan pelat yang digunakan tebal 2 cm, bentuk bujur sangkar 10 x 10 cm. Model sistem pelat terpaku menggunakan ukuran pelat 70 cm x 250 cm dengan tiang d=2 cm panjang 20 cm, spasi antar tiang adalah 10 cm. Untuk variasi kekakuan pelat, digunakan pelat dari bahan fleglass dengan dimensi yang sama seperti pelat dari mortar semen, dengan ketebalan 5 mm. Hubungan antara tiang dan pelat dibuat monolit untuk kedua tipe pelat. Gbr. 1 menunjukkan model pengujian laboratorium.



Gbr. 1. Model pengujian.

Pengembangan tanah dipicu dengan cara membasahi tanah rutin setiap hari dengan volume air sebanyak 300 liter. Perubahan *displacement* pelat dicatat setiap hari dengan menggunakan kaliper, pengukuran perubahan ketinggian permukaan pelat dilakukan terhadap balok referensi yang letaknya tetap. *Heave* tanah setiap kedalaman 10 cm juga diukur dan dicatat setiap harinya. Pembasahan kolam pengujian dan pengukuran *displacement*

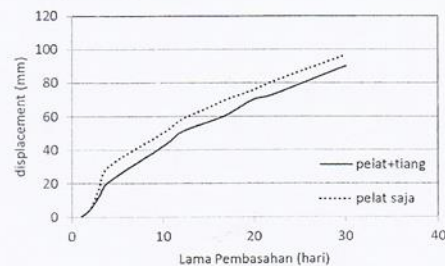
pelat dilakukan sampai perubahan *displacement* vertikal permukaan pelat relatif kecil. Pengembangan tanah dan pengukuran *displacement* pelat ini dilakukan selama kurang lebih 30 hari.

Tabel 1. *Properties Tanah*

Sifat Tanah		Standard
Specific gravity	2,64	ASTM D 854
Batas Cair (%)	94,39	ASTM D 4318
Batas plastis (%)	34,58	ASTM D 4318
Batas susut (%)	11,63	ASTM D 4318
Indeks Plastisitas (%)	59,81	ASTM D 4318
Fraksi butir halus		
lolos saringan no.200 (%)	96,32	ASTM D 422
Klasifikasi Unified	CH	ASTM D 2487
Klasifikasi AASTHO	A-7-6	ASTM D 3282
Berat volume kering maksimum (kN/m ³)	12,26	ASTM D 698
Kadar air optimum (%)	35,5	ASTM D 698
Aktifitas	0,69	-
Free Swell Ratio (FSR)	2	-
Free Swell index (FSI) (%)	100	-
Persen Pengembangan (%)	8,27	ASTM D4546
Tekanan pengembangan (kPa)	145	ASTM D 4546

2.2 Hasil Pengujian

Hasil pengujian disajikan dalam bentuk perbandingan grafik *displacement* pelat dari setiap variasi pengujian. Gbr. 2 merupakan grafik perbandingan *displacement* pelat perhari akibat pengembangan tanah dasar pada pelat dengan tiang tunggal.

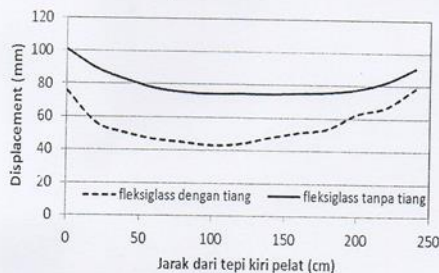


Gbr. 2. *Displacement* pelat dengan tiang tunggal.

Gbr.2 2 mengindikasikan bahwa pelat dengan kekuatan tiang (pelat terpaku) mengalami *displacement* vertikal yang lebih kecil dibandingkan dengan pelat tanpa tiang.

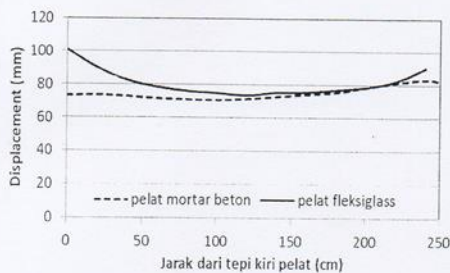
Gbr. 3 menunjukkan hasil pengukuran *displacement* sistem pelat terpaku

dibandingkan pelat tanpa perkuatan tiang pelat fleksiglass. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa, tiang mampu mereduksi *displacement* pelat akibat mengembangnya tanah dasar. Pada Gbr. 3 diketahui bahwa pola kurva *displacement* pelat tidak simetris di kedua tepi pelat dikarenakan kesulitan dalam persiapan tanah untuk memperoleh tanah yang padat dan homogen. Sehingga pengembangan tanah di kedua sisi menjadi berbeda.



Gbr. 3. Perbandingan *Displacement* pelat tanpa tiang dan sistem pelat terpaku dengan panjang tiang L=20 cm

Gbr. 4 menunjukkan perbandingan kurva deformasi sistem pelat terpaku dengan pelat dari mortar beton dan pelat dari fleksiglass. Dari gambar tersebut diketahui bahwa, kurva deformasi pelat (*mound shape*) fleksiglas, berbentuk lengkungan, sedangkan pelat dari mortar semen, pelat terangkat, tetapi tidak membentuk lengkungan, walaupun ketinggian tepi-tepi pelat berbeda antara satu dan lainnya. Hal ini disebabkan karena pelat beton memiliki kekakuan yang lebih besar di bandingkan fleksiglas.

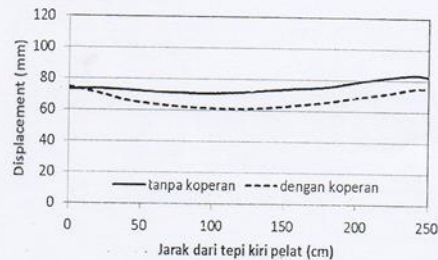


Gbr. 4. Pengaruh kekakuan pelat

Dari beberapa hasil yang diperoleh diketahui tiang mampu mereduksi *displacement* pelat. *Displacement* pelat akibat mengembangnya tanah berkurang karena

sistem pelat terpaku yang menjadi lebih berat dengan adanya tiang, yang melawan gaya angkat ke atas akibat pengembangan tanah. Tahanan gesek yang berkembang sepanjang selimut tiang juga merupakan gaya perlawanan.

Gbr. 5 menunjukkan pengaruh pemasangan koperan terhadap deformasi pelat akibat pengembangan tanah dasar. Koperan adalah dinding vertikal yang berfungsi sebagai penghalang kelembaban. Pada penelitian ini koperan dipasang pada sisi panjang pelat, sedalam 5 cm. Dari Gbr. 5, diketahui deformasi sistem pelat terpaku dengan koperan, lebih kecil dibandingkan sistim pelat terpaku tanpa koperan. Koperan menyebabkan lintasan aliran air ke bawah pelat menjadi lebih panjang. Koperan juga meningkatkan kekakuan pelat.



Gbr. 5. Perbandingan *Displacement* sistem pelat terpaku dengan koperan dan tanpa koperan

Dari pengamatan saat pengujian diketahui pula bahwa pada bagian yang tertutup pelat, kadar air tanahnya lebih rendah dibandingkan bagian tanah yang tidak tertutup pelat. Sehingga pengembangan tanah di bagian tengah pelat menjadi lebih rendah dibandingkan pengembangan tanah dibagian tepi-tepinya. Akibatnya, bagian tepi-tepi pelat akan terangkat, besarnya kekakuan pelat menyebabkan bagian tengah pelat ikut terangkat, sedangkan tanah yang berada dibagian tengah pelat tidak mengalami pengembangan yang sama dengan tanah dibagian tepi-tepi pelat, sehingga ada rongga antara permukaan tanah dengan dasar pelat. Tidak adanya kontak antara tanah dan pelat akan menyebabkan tidak tersalurnya beban luar dari pelat ke tanah. Sehingga, pelat menahan intensitas tegangan yang besar, jika terjadi terus menerus dapat menimbulkan kerusakan pada pelat. Sedangkan pada sistem pelat terpaku, tiang-tiang menahan pelat selalu

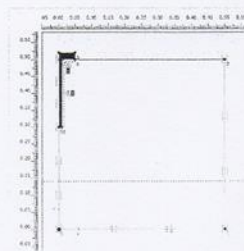
kontak dengan tanah dibawahnya, sehingga beban luar dapat didistribusikan langsung ke tanah dasar.

3 ANALISIS NUMERIS

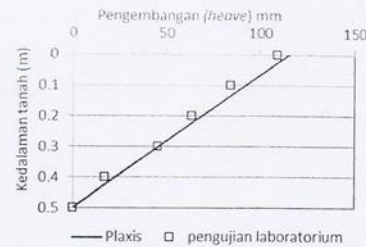
3.1 Pelat dengan Satu Tiang

Pelat dengan tiang tunggal, dianalisis menggunakan idealisasi elemen *axysimentry*. Model tanah yang digunakan adalah *Hardening Soil* (HS), sedangkan elemen pelat dan tiang menggunakan elemen linier elastik non porous. Sifat material yang diperoleh dari interpretasi pengujian oedometer pengembangan dan uji triaksial seperti pada Tabel 2.

Pada kasus di lapangan, pengembangan tanah terjadi akibat perubahan kadar air atau karena pelepasan beban. Sedangkan pada penelitian ini, pengembangan tanah dengan Plaxis dilakukan dengan mengaktifkan regangan volumetrik (ϵ_{vol}), regangan bernilai positif, yang artinya tanah mengembang. Besarnya nilai regangan volumetrik tanah ekspansif diperkirakan dari pengembangan uji oedometer dan cara coba-coba, sehingga hasil analisis mendekati hasil pengukuran pengembangan di laboratorium. Analisis pengembangan tanah dengan Plaxis mendekati dengan hasil pengukuran pengembangan tanah di laboratorium pada regangan volumetrik 30%. Pemodelan axysimetri yang telah dilakukan seperti pada Gbr. 6. Perbandingan *heave* terhadap kedalaman hasil analisis dan pengukuran seperti pada Gbr. 7. Untuk analisis selanjutnya, regangan volumetrik tanah digunakan nilai tersebut.



Gbr. 6. Pemodelan untuk pelat dengan tiang tunggal



Gbr. 7. Pengembangan tanah, perbandingan hasil pengukuran dan analisis dengan $\epsilon_{vol}=30\%$

Tabel 2. Model Material untuk pelat dengan tiang tunggal

No	Keterangan	Model Tanah	Struktur
1.	Model material	<i>Hardening soil model</i>	Linier Elastik
2.	Tipe material	Drained	Non Porous
3.	Unsaturated unit weight γ_{unsat} (kN/m^3)	15	22
4.	saturated unit weight γ_{sat} (kN/m^3)	18.70	-
5.	E_{so}^{ref} (kN/m^2)	6739,70	2500000
6.	E_{oed}	2449,23	-
7.	E_{ur}	20000	-
8.	Kohesi (c) (kN/m^2)	4,00	-
9.	Sudut gesek internal ($^\circ$)	30	-
10.	R_{inter}	0,8	-
11.	m	1	-

3.2 Sistem Pelat Terpaku

Model sistem pelat terpaku di idealisasi sebagai elemen *plane strain*. Model tanah menggunakan *Hardening Soil*, pelat dan tiang sebagai material *plate*. Sifat material seperti pada Tabel 3.

Masalah utama ketika memodelkan pelat dengan tiang adalah transisi dari 3 dimensi ke 2 dimensi. Penyelesaian masalah 3 dimensi menjadi 2 dimensi, elemen tiang disederhanakan menjadi elemen pelat (*dinding*), yang disebut tiang *plane strain*. Elemen tiang *plane strain* dihitung permeter tegak lurus bidang gambar. Model pelat berukuran 0,7 m x 2,5 m x 0,02 m dan tiang berdiameter 0,02 m panjang 0,2 m dengan jumlah tiang dalam arah lebar 7 tiang, dalam arah panjang 25 tiang (spasi tiang 0,1 m), *properties* tiang dalam *plane strain* di hitung sebagai berikut (Rytenius, 2011).

1. Kekakuan normal untuk tiang *plane strain*,

$$EA_{psp} = EA_p \frac{n_{p-row-i}}{L_r} \dots\dots\dots(1)$$

Dengan EA_{psp} adalah kekakuan normal untuk tiang *plane strain*, EA_p =kekakuan normal satu tiang, $n_{p-row-i}$ =jumlah tiang pada baris i, L_r = lebar pelat tegak lurus bidang gambar

2. Kekakuan lentur tiang *plane strain* ,

$$EI_{psp} = EI_p \frac{n_{p-row-i}}{L_r} \dots\dots\dots(2)$$

Dengan EI_{psp} adalah kekakuan lentur untuk tiang *plane strain*, EI_p =kekakuan lentur satu tiang,

3. Berat tiang *plane strain* ,

$$w_{psp} = w_p \frac{n_{p-row-i}}{L_r} \dots\dots\dots(3)$$

Dengan w_{psp} adalah berat tiang *plane strain*, w_p =berat satu tiang,

4. R_{inter} ekuivalen

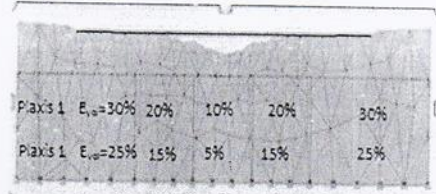
$$R_{inter eq} = \frac{n_{p-row-i} A_s}{2L_r} R_{inter} \dots\dots\dots(4)$$

Dengan A_s =luas selimut tiang perimeter kedalaman.

Tabel 3. Model Material untuk sistem pelat terpaku

No	Keterangan	Model Tanah	pelat	tiang
1.	Model material	Hardening soil model	plate	plate
2.	Tipe material	Drained	elastik	elastik
3.	Unsaturated unit weight γ_{unsat} (kN/m ³)	15	-	-
4.	saturated unit weight γ_{sat} (kN/m ³)	18.70	-	-
5.	$E_{50 ref}$ (kN/m ²)	6739,70	-	-
6.	E_{oed}	2449,25	-	-
7.	E_{ur}	20000	-	-
8.	Kohesi (c) (kN/m ²)	5	-	-
9.	Sudut gesek internal (°)	30	-	-
10.	R_{inter}	0,8	-	-
12.	EA	-	$3,5 \cdot 10^6$	$7,85 \cdot 10^5$
13.	EI	-	41,667	1,96
14.	ν	0,4	0,2	0,2
15.	Weight (w)	-	0,48	0,075

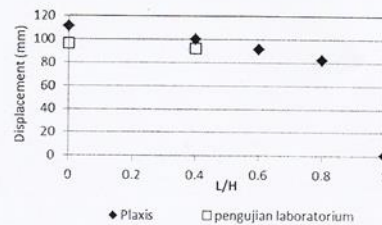
Pengembangan tergantung pada lokasi dari sumber air dan besarnya tekanan *overburden*. Untuk penyederhanaan analisis *volumetric strain* diaplikasikan seragam sepanjang ketebalan lapisan tanah ekspansif, dan bervariasi pada bagian tepi dan tengah pelat. dengan dua skenario pengembangan yaitu plaxis 1 dan plaxis 2 dengan distribusi pengembangan volume seperti pada Gbr. 8.



Gbr. 8. Displacement hasil pemodelan pengembangan dengan variasi ϵ_{vol} di bawah pelat.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Gbr. 9 menunjukkan perbandingan displacement hasil pengukuran dan analisis menggunakan Plaxis. Displacement pelat 10 cm x 10 cm dengan tiang panjang 20 cm, karena pengembangan tanah hasil pengukuran di laboratorium dan hasil analisis Plaxis menunjukkan hasil yang hampir sama.

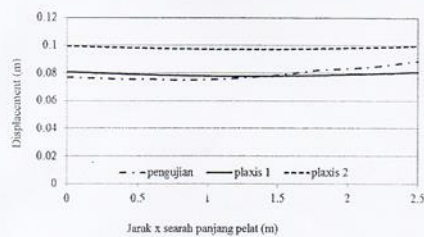


Gbr. 9. Perbandingan displacement pelat dengan tiang tunggal

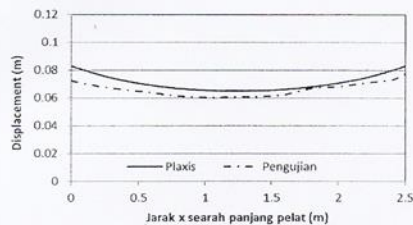
Dari pengujian dan analisis dengan Plaxis diketahui bahwa semakin panjang tiang, semakin kecil displacement pelat. Pada panjang tiang (L) yang sama dengan ketebalan lapisan tanah ekspansif (H) L/H=1, displacement pelat hampir tidak terjadi. Pelat tanpa kekuatan tiang ditunjukkan pada L/H=0.

Perbandingan hasil pengujian model sistem pelat terpaku di laboratorium dengan hasil analisis seperti pada Gbr. 10 dan 11. Pada Gbr.

10. menunjukkan bahwa analisis numeris dengan pengembangan skenario Plaxis 2 lebih mendekati hasil uji laboratorium, yaitu pada regangan volume pada bagian pinggir sebesar 25%. Gambar 11, untuk analisis sistem pelat terpaku dengan tiang 20 cm, hasil analisis plaxis dengan Plaxis 1 (regangan volumetrik 30%) lebih besar dibanding hasil pengukuran, tetapi bentuk kurva yang dihasilkan hampir sama. Dari kurva *displacement* seperti Gbr. 8, diketahui bahwa pada analisis dengan Plaxis, pelat cenderung terangkat ke atas akibat pengembangan tanah pada bagian tepi-tepi pelat, sedang bagian tengah pelat, pengembangan tanah relatif lebih kecil dibandingkan bagian tepi-tepinya, sehingga terdapat rongga antara tanah dan pelat.



Gbr. 10. Perbandingan *displacement* pelat tanpa perkuatan tiang



Gbr. 11. Perbandingan *displacement* sistem pelat terpaku.

Deformasi pelat pada sistem pelat terpaku seperti pada Gbr. 12. Simulasi pengembangan tanah dilakukan sama seperti pada pengembangan tanah dengan pelat saja. Dari Gbr. 12 diketahui bahwa dengan perkuatan tiang-tiang pada sistem pelat terpaku, disamping *displacement* pelat berkurang, pelat juga tetap kontak dengan tanah.



Gbr 12. Deformasi Sistem Pelat Terpaku

Dari hasil pengujian di laboratorium, dan simulasi numeris dengan Plaxis diketahui bahwa, sistem pelat terpaku berpotensi di jadikan sebagai alternatif struktur perkerasan pada tanah ekspansif, untuk mereduksi pengangkatan struktur akibat mengembangnya tanah dasar, dan membuat pelat perkerasan tetap kontak dengan tanah dasar, sehingga beban luar dapat disalurkan ke tanah dasar secara lebih merata.

5 KESIMPULAN

- Perkuatan pelat dengan menggunakan tiang, mampu mereduksi *displacement* pelat akibat pengembangan tanah dasar, semakin panjang tiang, *displacement* pelat semakin kecil.
- Pola deformasi pelat pada sistem pelat terpaku dipengaruhi oleh fleksibilitas dari bahan pelat. Kurva deformasi pada pelat dari fleksiglas (lebih fleksibel dibanding mortar semen) membentuk lengkungan.
- Displacement* yang terjadi pada sistem pelat terpaku dengan koperan lebih kecil dibandingkan dengan sistem pelat terpaku tanpa koperan.
- Tiang-tiang pada sistem pelat terpaku mampu membuat pelat tetap kontak dengan tanah.
- Hasil analisis numeris dengan Plaxis menunjukkan kurva yang serupa dengan hasil pengujian laboratorium, walaupun besarnya *displacement* dari analisis Plaxis (dengan regangan volumetrik 30%) lebih besar dari *displacement* hasil pengujian laboratorium.
- Hasil yang diperoleh dari Plaxis sangat tergantung pada idealisasi (penyederhanaan model), sehingga pemodelan sistem pelat terpaku dengan menggunakan Plaxis perlu dieksplorasi lebih lanjut.

PENGHARGAAN

Penelitian ini merupakan bagian dari Hibah Penelitian Disertasi Doktor (PDD) 2016. Terima kasih dihaturkan kepada kementerian Ristek dan Pendidikan Tinggi RI.

DAFTAR PUSTAKA

- Diana, W., Hardiyatmo, H.C., Suhendro, B., 2015. Small Scale Experimental Investigation on The Nailed Slab System in Expansive Soil. In *Advance Science and Technology for Society*. AIP Publishing.
- Hardiyatmo, H.C., 2008a. Sistem Cakar Ayam Sebagai Alternatif Penanganan Masalah Perkerasan Kaku (Rigid Pavement) Pada Tanah ekspansif. In *Seminar Nasional Teknologi Tepat Guna Penanganan Sarana Prasarana di Indonesia*. Yogyakarta, Seminar Nasional Teknologi Tepat Guna Penanganan Sarana Prasarana di Indonesia.
- Hardiyatmo, H.C., 2008b. Sistem "Pelat Terpaku" (Nailed Slab system) Untuk Perkuatan Pelat Beton Pada Perkerasan Kaku (Rigid Pavement). In *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Tepat Guna Dalam Penanganan Sarana-prasarana*. Yogyakarta, MPSP JTSL FT UGM.
- Hardiyatmo, H.C., 2011. Method To Analyze The Deflection of The Nailed Slab System. *International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS*, pp.22-28.
- Hashem, M.D. & Abu-Baker, A.M., 2013. Numerical Modelling of Flexible Pavement Constructed on Expansive Soils. *European International Journal of Science and Technology*, 2(10), pp.19-34.
- Ibrahim, S.F. & Aljorany, A.N., 2014. Heave Behaviour of Granular Pile-Anchor Foundation (GPA-Foundation) System in Expansive Soil. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 4(3), pp.213-22.
- Ismail, A.M. & Shahin, M., 2011. Finite Element Analysis of Granular Pile Anchors as a Foundation Option for Reactive soils. In *International Conference on Advances in Geotechnical Engineering (ICAGE 2011)*. Perth, 2011.
- Kaufmann, K.L., Nielsen, B.N. & Augustesen, A.A., 2010. *Finite Element Investigation on The Interaction between a Pile and Swelling Clay*. Technical Reports. Aalborg: Aalborg University.
- Mohamedzein, Y.E.A., 2006. Finite Element Analysis of Piers in Expansive Soils. In Al-Rawas, A.A. & Goosen, M.F.A. *Expansive Soils Recent Advances in Characterization and Treatment*. London: Taylor & Francis Group. pp.231-43.
- Muntohar, A.S., 2016. A Numerical Method of The Flexible pavement Supported by SSC on Expansive Soils. *Applied Mechanics and Materials*, pp.62-69.
- Nelson, J.D., Chao, K.C., Overton, D.D. & Nelson, E.J., 2015. *Foundation Engineering For Expansive Soil*. New Jersey: John Wiley & Son.
- Nusier, O.K. & Alawanch, A.S., 2004. Micropile Technique to Control Upward Movement of Lightweight Structure Over Expansive Soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 22, pp.89-104.
- Plaxis, 2007. *Plaxis 2D Versi 8*. Delft: Plaxis B.V.
- Puri, A., 2015. *Perilaku Perkerasan Sistem Pelat Terpaku Pada Tanah Dasar Lempung Lunak (soft Clay)*. Disertasi Doktor. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada Universitas Gadjah Mada.
- Ryltenius, A., 2011. *FEM Modelling of Piled Raft Foundation in Two and Three Dimention*. Master Dissertation. Sweden: Geotechnical Engineering Lund University.
- Sharma, R.S. & Phanikumar, B.R., 2005. Laboratory Study of Heave Behavior of Expansive Clay Reinforced with Geopiles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131, pp.512-20.
- Sorochan, 1991. *Constructio of Buildings on Expansive Soils*. Brookfield: A.A. Balkema Publishers.
- Tono, M.C., Gokceoglu, C. & Ulusay, R., 2006. Stabilization of expansive Ankara Clay with Lime. In A.A. Al-Rawas & M.A. Goosen, eds. *Expansive Soils Recent advance in characterization and treatment*. London: Taylor & Francis Group. pp.317-40.
- Zhang, C.S., Wang, Y.H., Xiao, H.B. & Fan, Z.H., 2009. Numerical Simulation of Soil-Pile Interaction in Expansive Soils Foundation. *Soil and Rock Instrumentation, Behaviour, and Modelling ASCE*, pp.99-105.

