

**LAPORAN TAHUNAN/AKHIR
PENELITIAN UNGGULAN PERGURUAN TINGGI**



**PENGEMBANGAN FONDASI PERKERASAN LENTUR
JALAN DENGAN KOLOM *ECO Si-CC*
PADA TANAH EKSPANSIF**

Tahun ke -1 dari rencana 3 tahun

Dr.Eng. Agus Setyo Muntohar, ST., M.Eng.Sc.	NIDN: 0514087501
Sri Atmaja P. Rosyidi, ST., M.Sc.Eng., Ph.D.	NIDN: 0515047801
Willis Diana, ST., MT.	NIDN: 0522087401
Iswanto, ST., M.Eng.	NIDN: 0502098101

Berdasarkan :

DIPA Kopertis Wilayah V Tahun Anggaran 2014
Nomor: SP DIPA-023.04.2.189971/2014 Tanggal 5 Desember 2013
dan Surat Perjajinan Pelaksanaan Hibah Penelitian
Nomor : 1314/K5/KM/2014 tertanggal 6 Mei 2014

**UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH YOGYAKARTA
NOVEMBER 2014**

HALAMAN PENGESAHAN PENELITIAN UNGGULAN PERGURUAN TINGGI

Judul Penelitian : PENGEMBANGAN FONDASI PERKERASAN LENTUR
JALAN DENGAN KOLOM ECO Si-CC PADA TANAH
EKSPANSIF

Ketua Peneliti :
A. Nama : Dr.Eng. Agus Setyo Muntohar, S.T., M.Eng.Sc.
B. NIDN : 0522087401
C. Jabatan Fungsional : Lektor
D. Program Studi : Teknik Sipil
E. Nomor HP : 082138363248
F. Alamat surel (e-mail) : muntohar@umy.ac.id

Anggota Peneliti (1) :
A. Nama : Sri Atmaja Putra J N N R, ST., M.Sc., Ph.D.
B. NIDN : 0515047801
C. Perguruan Tinggi : Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Anggota Peneliti (2) :
A. Nama : Willis Diana, ST., MT.
B. NIDN : 0522087401
C. Perguruan Tinggi : Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Anggota Peneliti (3) :
A. Nama : Iswanto, ST., M.Eng.
B. NIDN : 0502098101
C. Perguruan Tinggi : Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Institusi Mitra :
Nama Institusi Mitra :
Alamat :
Penanggung Jawab :
Tahun Pelaksanaan : Tahun ke -1 dari rencana 3 tahun
Biaya Tahun Berjalan : Rp. 75.000.000
Biaya Penelitian : Rp.443.080.000
Keseluruhan :



Mengetahui,
Ketua Lembaga Penelitian

Hilman Latif, MA., Ph.D.
NIP/NIK. 19750912 200004 153019

Yogyakarta, 15 Juli 2014

Pengusul

Dr.Eng. Agus Setyo Muntohar
NIP/NIK. 1975140875 19994 123 040

DAFTAR ISI

BAB 1.	PENDAHULUAN _____	2
1.1	Latar Belakang	2
1.2	Keutamaan Penelitian	3
1.3	Luaran Penelitian	4
BAB 2.	TINJAUAN PUSTAKA _____	5
2.1	Hasil-Hasil Penelitian Terdahulu	5
2.2	Hasil-Hasil Penelitian Pustaka Rujukan	6
2.2.1	Perbaikan Tanah dengan Teknik Kolom-Kapur (lime-column)	6
2.2.2	Campuran Limbah Karbit	7
2.3	Kuat Dukung Tanah Dasar	9
2.4	Peta Jalan Penelitian	11
BAB 3.	TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN _____	13
3.1	Tujuan Penelitian	13
3.2	Manfaat Penelitian	13
BAB 4.	METODE PENELITIAN _____	15
4.1	Kerangka Penelitian	15
4.2	Tahapan Penelitian Tahun Pertama	16
4.2.1	Bahan dan Alat	16
4.2.2	Uji CBR Laboratorium	23
4.2.3	Pemodelan Laboratorium	26
4.2.4	Pemodelan Numerik	30
4.2.5	Analisis Data	34
BAB 5.	HASIL YANG DICAPAI _____	35
5.1	Hasil Penelitian	35
5.1.1	Sifat-Sifat Tanah Dasar	35
5.1.2	CBR Laboratorium	37
5.1.3	Perilaku Sistem Fondasi Dengan Kolom-Kolom	39
5.2	Pembahasan	45
5.3	Luaran Penelitian Yang Telah Dicapai	46
BAB 6.	RENCANA TAHAPAN BERIKUTNYA _____	47
BAB 7.	KESIMPULAN DAN SARAN _____	48
BAB 8.	DAFTAR PUSTAKA _____	49

LAMPIRAN	54
Lampiran A :	54
NASKAH SEMINAR NASIONAL Konferensi Nasional Teknik Sipil ke-8, Bandung 16-17 Oktober 2014	
Lampiran B :	55
NASKAH SEMINAR INTERNASIONAL Southeast Asian Conference on Soft Soils and Ground Improvement (Soft Soils 2014), Bandung 21–23 Oktober 2014	
Lampiran C :	56
UNDANGAN SEBAGAI VISITING PROFESSOR/SCIENTIST Faculty of Engineering, Kasetsart University Bangkok, Thailand	
Lampiran D :	57
REKAPITULASI PENGGUNAAN DANA PENELITIAN	

RINGKASAN

Permasalahan yang sering dijumpai pada konstruksi yang dibangun di atas tanah lunak dan tanah ekspansif adalah penurunan tanah yang besar saat basah yang menyebabkan kuat dukung tanah yang sangat rendah, dan susut yang tinggi saat kering yang menyebabkan retakan pada tanah dasar dan permukaan perkerasan jalan. Untuk itu sistem fondasi untuk perkerasan jalan hendaknya memiliki kinerja yang lebih baik ditinjau dari aspek teknis (*strength, stiffness, serviceability, stability, dan durability*), maupun aspek ekonomisnya yang mencakup investasi awal dan biaya perawatan jangka panjang selama dioperasikan. Perbaikan tanah dengan menggunakan bahan dari limbah industri seperti abu terbang, limbah karbit, abu sekam padi dapat menjadi alternatif bahan perbaikan tanah. Pemanfaatan limbah industri tersebut dapat mengatasi permasalahan lingkungan dan memberikan keuntungan bagi pekerjaan konstruksi. Pada sisi lain, limbah karbit dan abu sekam padi adalah dua bahan yang cukup banyak dijumpai di Indonesia. Limbah karbit mengandung unsur kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) yang berpotensi sebagai bahan pembentuk pozzolan bila dicampur dengan unsur *silica* (SiO_2) dari abu sekam padi. Untuk itu pemanfaatannya dalam bidang konstruksi seperti sebagai perbaikan tanah dasar jalan atau fondasi dapat memberikan keuntungan konstruksi untuk menciptakan konstruksi ramah lingkungan atau *green-construction*. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengkaji penggunaan teknik kolom untuk struktur perkerasan lentur pada tanah ekspansif di laboratorium dan lapangan. Penelitian ini direncanakan untuk kurun waktu tiga tahun yang meliputi tahap pengujian model laboratorium, tahap pengujian model di lapangan (full scale), dan tahap monitoring serta evaluasi struktur perkerasan jalan. Pada tahun ke-1 penelitian bertujuan untuk mengkaji susunan kolom yang memberikan kuat dukung tanah yang tinggi, dan mengkaji karakteristik beban dan deformasi vertikal tanah dasar sebelum dan setelah pemasangan teknik kolom di laboratorium. Hasil penelitian pada tahun ke-1 telah disajikan pada Konferensi Nasional Teknik Sipil ke-8 dengan judul naskah PERILAKU BEBAN – DEFORMASI PELAT FLEKSIBEL DIDUKUNG DENGAN KOLOM-KOLOM ECO-SiCC DI TANAH EKSPANSIF yang diselenggarakan di Bandung pada tanggal 16–17 Oktober 2014, dan seminar internasional Southeast Asian Conference on Soft Soils and Ground Improvement (Soft Soils 2014) dengan judul naskah IMPROVEMENT OF EXPANSIVE SUBGRADE USING COLUMN TECHNIQUE OF CARBIDE LIME AND RICE HUSK ASH MIXTURES yang diselenggarakan di Bandung pada tanggal 21–23 Oktober 2014. Luaran penelitian lainnya berupa undangan sebagai *Visiting Professor/Scientist* dari Faculty of Engineering, Kasesart University di Bangkok, Thailand untuk periode Agustus – September 2014. Luaran penelitian lainnya berupa undangan sebagai *Visiting Professor/Scientist* dari Faculty of Engineering, Kasesart University di Bangkok, Thailand untuk periode Agustus – September 2014.

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Pada banyak pekerjaan perkerasan jalan di atas tanah ekspansif seperti pada ruas jalan Surabaya – Bojonegoro (Prabowo, 2010), Caruban – Ngawi (Widajat dan Suherman, 2008), Indramayu – Pamanukan (Daud dkk., 2009) digunakan sistem perkerasan kaku baik yang telah dimodifikasi dengan tambahan tiang (*mini pile*) atau sistem Cakar Ayam. Pekerjaan perkerasan jalan di atas tanah lunak dengan menggunakan sistem perkerasan kaku ini memenuhi aspek teknis tetapi biaya konstruksi menjadi sangat mahal yaitu berkisar Rp. 4-5 milyar/km dibandingkan dengan Rp. 1-1,8 milyar/km untuk sistem perkerasan lentur (Widajat & Suherman, 2008; Daud dkk., 2009; Prabowo, 2010).

Pada struktur perkerasan lentur, deformasi yang terjadi akibat beban dan kembang – susut tanah menjadi sangat besar. Untuk mengurangi terjadinya deformasi yang berlebihan pada permukaan jalan, maka tanah dasar dan lapisan-lapisan struktur perkerasan harus mampu menahan tekanan ke atas akibat pengembangan tanah. Muntohar (2006) menyebutkan bahwa berat perkerasan jalan harus mampu menahan tekanan pengembangan ini agar tidak terjadi deformasi vertikal. Namun, penggunaan lapisan perkerasan yang sangat tebal akan meningkatkan biaya konstruksi perkerasan jalan. Memperhatikan perilaku tanah ekspansif tersebut, dikenal beberapa metode penanganan untuk daerah tanah ekspansif seperti penggantian material tanah ekspansif, memperbaiki karakteristik tanah ekspansif secara mekanis dan atau kimiawi, *counterweight*, pemasangan geomembran horisontal dan atau vertikal.

Pada prakteknya, banyak konstruksi jalan jenis perkerasan lentur yang ditingkatkan umur pelayanannya dengan pekerjaan *overlay* tanpa perbaikan tanah dasarnya. Untuk itu, diperlukan suatu metode yang dapat memperbaiki tanah dasar dan sekaligus sebagai sistem perkuatan perkerasan lentur. Penggunaan kolom – kolom berdiameter mikro (15 – 30 cm) berisi semen, kapur, atau mortar yang dibuat pada struktur perkerasan lentur sebelum pekerjaan *overlay* adalah suatu metode yang perlu dikembangkan. Dalam pelaksanaannya, kolom – kolom ini dapat dikerjakan seperti pelaksanaan fondasi tiang bor.

Teknik perbaikan tanah ekspansif secara kimiawi dengan menggunakan kapur telah banyak diterapkan. Umumnya kapur dicampurkan ke lapisan tanah dasar jalan yang ekspansif, dipadatkan pada kadar air tertentu (Sahoo & Pradhan, 2010; Adam dkk., 2012). Teknik lain yang digunakan adalah dengan teknik kolom kapur (*lime-column*) seperti yang diterapkan oleh Muntohar (2003), Budi (2003), Muntohar & Liao (2006), dan Tonoz dkk. (2005). Akan tetapi teknik kolom kapur ini lebih diarahkan untuk perbaikan tanah dalam atau dikenal dengan *deep ground improvement* yang memiliki ukuran diameter mencapai 1 m dan kedalaman hingga 20 m (Broom, 1981; Rogers & Glendinning, 1997; Porbaha dkk., 1999). Selain itu, teknik kolom ini juga dapat digunakan sebagai fondasi untuk bangunan gedung (Kempfert, 2003). Walaupun demikian aplikasi teknik kolom ini masih diperlukan untuk dikaji untuk struktur perkerasan jalan.

Perbaikan tanah dengan menggunakan bahan dari limbah industri seperti abu terbang, limbah karbit, abu sekam padi dapat menjadi alternatif bahan perbaikan tanah. Pemanfaatan limbah industri tersebut dapat mengatasi permasalahan lingkungan dan memberikan keuntungan bagi pekerjaan konstruksi (Kamon dan Nontananandh, 1991). Pada sisi lain, limbah karbit dan abu sekam padi adalah dua bahan yang cukup banyak dijumpai di Indonesia. Limbah karbit mengandung unsur kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) yang berpotensi sebagai bahan pembentuk pozzolan bila dicampur dengan unsur *silica* (SiO_2) dari abu sekam padi. Untuk itu pemanfaatannya dalam bidang konstruksi seperti sebagai perbaikan tanah dasar jalan atau fondasi dapat memberikan keuntungan konstruksi untuk menciptakan konstruksi ramah lingkungan atau *green-construction*.

1.2 KEUTAMAAN PENELITIAN

Struktur perkerasan jalan di atas tanah ekspansif harus memenuhi aspek teknis, ekonomis, dan lingkungan. Untuk itu diperlukan suatu rancangan struktur perkerasan jalan yang memenuhi tiga aspek tersebut. Untuk itu struktur perkerasan perlu yang dirancang seperti halnya perancangan pelat-kolom, sehingga dimensi lapis perkerasan dan kolom dirancang berdasar beban lalu-lintas rancangan yang paling kritis. Sistem perkerasan teknik kolom perlu dirancang kuat menahan momen, gaya lintang dan geser pons, sehingga pengaruh beban-beban tambahan seperti: beban akibat vibrasi tanah-dasar dan naik-turunnya tanah-dasar akibat ekspansif susut tanah-dasar dapat diperhitungkan dalam perancangan. Muntohar (2006) secara khusus menyebutkan bahwa konstruksi jalan di atas

tanah ekspansif menyebabkan kerusakan di beberapa ruas jalan nasional, provinsi, dan kabupaten di wilayah Yogyakarta. Permasalahan yang sering dijumpai pada konstruksi yang dibangun di atas tanah lunak dan tanah ekspansif adalah penurunan tanah yang besar saat basah yang menyebabkan kuat dukung tanah yang sangat rendah, dan susut yang tinggi saat kering yang menyebabkan retakan pada tanah dasar dan permukaan perkerasan jalan. Untuk itu sistem fondasi untuk perkerasan jalan hendaknya memiliki kinerja yang lebih baik ditinjau dari aspek teknis (*strength, stiffness, serviceability, stability, dan durability*), maupun aspek ekonomisnya yang mencakup investasi awal dan biaya perawatan jangka panjang selama dioperasikan.

Pada tanah ekspansif, struktur perkerasan jalan harus mampu menahan tekanan ekspansif (*swelling pressure*) dari lapisan tanah dasar di bawah lapis perkerasan. Untuk itu, teknik perbaikan tanah dengan metode kolom juga harus mampu mengurangi tekanan ekspansif dan sifat ekspansif-susut tanah. Kajian awal yang dilakukan oleh Budi (2003), Muntohar (2006) dan Tonoz dkk., (2005) telah menunjukkan bahwa teknik kolom kapur telah mampu mengurangi sifat ekspansif-susut dan tekanan ekspansif tanah. Dengan demikian jarak antar kolom serta bahan pengisi kolom perlu dikaji agar memenuhi aspek teknis. Agar memenuhi aspek ekonomis dan lingkungan, maka diperlukan komposisi yang sesuai antara campuran limbah karbit dan abu sekam padi sebagai bahan pengisi kolom.

1.3 LUARAN PENELITIAN

Hasil akhir dari rangkaian penelitian ini adalah berupa teknologi terapan untuk perkerasan jalan di atas tanah ekspansif. Pada rancangan tersebut akan diperoleh luaran berupa Hak Paten/HaKI untuk metode perancangan, komposisi bahan, dan rancangan struktur perkerasan lentur jalan yang didukung oleh kolom-kolom (Metode Kolom Eco Si-CC).

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 HASIL-HASIL PENELITIAN TERDAHULU

Muntohar (2003) melakukan kajian tentang kuat tekan bebas campuran tanah lempung dan kapur. Kapur yang dicampurkan ke dalam tanah tersebut bervariasi dengan kadar 3% hingga 12%. Hasil penelitian mengusulkan bahwa kadar kapur sejumlah 6% terhadap berat tanah sudah cukup untuk meningkatkan kekuatan tanah. Kekuatan kolom kapur terus meningkat sejalan dengan waktu hingga 56 hari, namun penambahan kekuatan relatif kecil setelah umur 7 hari.

Muntohar dan Liao (2006) melakukan kajian penyebaran kekuatan tanah disekitar kolom kapur yang berdiameter 50 mm di laboratorium. Hasil kajian ini menyebutkan bahwa penyebaran kekuatan tanah disekitar kolom kapur terjadi pada arah radial dan arah vertikal. Pada arah radial, kekuatan tanah dapat meningkat hingga jarak 4 kali diameter ($4 \times D$). Sedangkan pada arah vertikal, kekuatan tanah dapat meningkat hingga pada kedalaman $8 \times D$ dibawah kolom kapur.

Muntohar dkk (2008b) telah melakukan pengujian lapangan terhadap kekuatan tanah di sekitar kolom-kapur. Kolom kapur yang digunakan berukuran diameter 0,152 m (6 inch) dan panjang kolom yang dipasang 1,5 m. Berdasarkan hasil uji sondir sebelum pemasangan kolom kapur, tanah di kedalaman 1,6 m – 2,0 m berpotensi mengalami likuifaksi yang mana nilai kuat dukungannya sangat rendah yaitu berkisar 0,19 MPa – 0,29 MPa. Namun, setelah pemasangan kolom-kapur, nilai q_c menunjukkan peningkatan pada kedalaman 1,6 m hingga 2 m. Kejadian ini menjadi salah satu indikasi adanya pengurangan resiko likuifaksi.

Kajian tentang campuran kapur dan abu sekam padi untuk perbaikan tanah lempung telah dilakukan sebelumnya untuk menentukan perbandingan campuran yang menghasilkan sifat-sifat tanah yang baik. **Muntohar** (2005a) memperoleh bahwa proporsi campuran kapur – abu sekam padi dengan perbandingan 1 : 2 (pada kadar kapur optimum) memberikan peningkatan kekuatan yang sangat baik. Tanah yang dicampur dengan kapur dan abu sekam padi memiliki kekuatan atau kuat geser yang sangat tinggi jika dibandingkan dengan tanah yang tidak distabiliasi. Namun

cenderung untuk berperilaku getas (*brittle*) seperti ditunjukkan oleh oleh **Muntohar** dan Hashim (2002). **Muntohar** (2002) menunjukkan bahwa penambahan abu sekam padi pada 6% kapur, cenderung menyebabkan tanah menjadi berperilaku agak getas. Penelitian yang dilakukan oleh Basha dkk (2005) menunjukkan bahwa kekuatan yang tinggi dicapai oleh tanah *residual* yang distabilisasi oleh semen dan abu sekam padi. Pada campuran 8% semen dan 20% abu sekam padi, tanah berperilaku agak getas jika dibandingkan dengan tanah yang hanya distabilisasi oleh 10% semen. Hasil kajian yang dilakukan oleh **Muntohar** (2005b) menyebutkan kekuatan geser yang tinggi ini juga diikuti oleh perilaku tanah yang getas sebagai akibat terbentuknya cemented material seperti *calcium silicate hydrate* (CSH). Kekuatan tanah ini terus meningkat seiring dengan bertambahnya waktu sebagai akibat adanya reaksi pozolanisasi antara partikel tanah, kapur dan abu sekam padi. Salah satu hal penting dalam stabilisasi tanah adalah ketahanan terhadap rendaman air. Akibat rendaman air selama 7 hari, tanah yang distabilisasi dengan 6% kapur hanya memiliki kekuatan sebesar 40% dari kekuatan tanah jika tidak direndam. Namun dengan penambahan abu sekam padi hingga mencapai 12%, kekuatan tanah yang direndam mampu meningkat hingga mencapai 70% dari kekuatan tanah tanpa direndam (**Muntohar**, 2005b).

2.2 HASIL-HASIL PENELITIAN PUSTAKA RUJUKAN

2.2.1 Perbaikan Tanah dengan Teknik Kolom-Kapur (lime-column)

Stabilisasi tanah menggunakan teknik kolom atau campuran kapur-semen merupakan metode yang sering dilakukan untuk perbaikan tanah khususnya tanah lunak. Metode ini dilakukan dengan cara memasukkan campuran kering kapur ke dalam tanah lempung sehingga terbentuklah kolom-kolom tegak (Rogers & Glendinning, 1997). Metode ini telah terbukti dapat mengurangi biaya konstruksi dibandingkan dengan metode lainnya seperti pada konstruksi jalan dan embankment jalan kereta, timbunan di atas tanah lunak (Baker, 2000). Uji model di lapangan oleh Baker (2000) menunjukkan bahwa penggunaan kolom kapur memiliki daktilitas yang lebih baik dibandingkan dengan kolom kapur-semen. Bahan yang digunakan untuk membuat kolom seperti kapur atau semen atau kapur-semen akan menyebar melalui rongga atau pori tanah sehingga terjadi reaksi sementasi dengan tanah di sekitar kolom. Sebagai hasilnya, teknik ini meningkatkan kuat dukung dan mengurangi

penurunan sebagai akibat dari meningkatnya kekuatan dan kekakuan tanah. menyimpulkan bahwa kapur dalam kolom kapur dapat merubah sifat-sifat tanah lempung dalam waktu 1 – 3 hari setelah pembuatan kolom. Penggunaan kapur untuk pembuatan kolom kapur didasarkan pada kebutuhan awal kapur (*initial consumption of lime*) oleh tanah yang penentuannya mengacu pada ASTM C977-98 (Roger dan Glendinning, 2002).

Zhou dkk. (2002) mengkaji tentang kapasitas dukung dan settlement dari kolom kapur-*fly ash* dengan uji model lapangan. Uji lapangan ini menggunakan dua model yang berbeda yaitu kolom tunggal dan kelompok kolom dengan kadar kapur 10% dan 20%. Kolom tunggal berdiameter 0,50 m dan panjang 9,6 m, sedangkan kelompok kolom tersusun dari 4 kolom tunggal yang dihubungkan dengan kepala kolom berukuran 2 m x 2 m dengan jarak antar kolom 1 m. diketahui bahwa kelompok kolom kapur-abu terbang mengalami penurunan lebih besar dibandingkan dengan kolom tunggal untuk kadar kapur yang sama. Namun demikian, kelompok kolom kapur-abu terbang mencapai kuat dukung yang lebih besar daripada kolom tunggal. Hal lain menunjukkan kinerja kolom kapur-abu terbang dalam kelompok lebih baik dibandingkan kolom tunggal.

Tonoz dkk. (2003) melakukan kajian model di laboratorium terhadap karakteristik kolom kapur untuk tanah lempung mengembang pada arah radial terhadap pusat kolom. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa jarak efektif dari pengaruh kolom kapur adalah 1 kali diameter ke arah radial. Namun, kolom kapur masih mampu memperbaiki sifat-sifat geoteknis seperti kekuatan dan pengembangan sampai dengan jarak 2 kali diameter ($2 \times D$). Hasil serupa dengan Tonoz et. al (2003) juga dikemukakan oleh Budi (2003) bahwa penyebaran kekuatan akibat pembuatan kolom kapur adalah sampai dengan jarak 2,5–3 kali diameter kolom ($2,5D-3D$) dengan kekuatan terbesar di dekat kolom. Tonoz dkk. (2003) dan Budi (2003) mengkaji karakteristik kolom kapur terhadap sifat-sifat tanah adalah pada umur kolom 7 dan 28 hari dengan asumsi bahwa pada umur-umur tersebut telah terjadi reaksi kimia antara kapur dan tanah yang menyebabkan perubahan sifat-sifat tanah secara tetap.

2.2.2 Campuran Limbah Karbit

Limbah karbit banyak mengandung unsur Ca(OH)_2 yang mana jika direaksikan dengan bahan pozzolan SiO_2 seperti abu sekam padi (*rice husk ash*, RHA), atau abu

terbang (*fly ash*, FA) dapat digunakan sebagai bahan pengganti semen. Jaturapitakkul dan Roongreung (2003) mengkaji pasta dan mortar dari campuran CCR dan RHA dengan variasi perbandingan 20:80,35:65, 50:50, 65:35, dan 80:20. Mortar tersebut dibuat dengan perbandingan air-semen sebesar 0,65. Dua jenis pengujian yang dilakukan adalah uji setting time pasta campuran CCR dan RHA dan kuat tekan mortar. Kuat tekan mortar diuji pada umur benda uji 1, 3, 7, 14, 28, 60, 90, dan 180 hari. Sebagai variabel kontrol dibuat pula benda uji dengan bahan semen atau *original portland cement* (OPC). Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa kuat tekan mortar mencapai nilai yang tertinggi dengan campuran CCR dan RHA sebanyak 50 : 50 namun masih lebih rendah dibandingkan dengan OPC. Kuat tekan mortar meningkat seiring dengan bertambahnya umur. Namun demikian, setting time pasta campuran CCR dan RHA masih lebih lama dibandingkan dengan pasta OPC. Mortar dengan campuran 50% CCR dan 50% RHA mencapai kuat tekan yang paling tinggi yaitu 15,6 MPa dan 19,1 MPa masing-masing pada umur 28 dan 180 hari. Bahan semen dari CCR dan RHA ini dapat digunakan untuk beton mutu rendah.

Hasil yang serupa ditunjukkan oleh Krammart dan Tangtermsirikul (2003, 2004) yang mana melakukan kajian terhadap pasta dan mortar dari semen yang dicampur dengan bottom ash yang berasal dari limbah padat rumah tangga atau municipal solid waste (MSW) dan juga limbah karbit Kadar masing – masing MSW dan CCR yang dicampur dengan semen adalah 5% dan 10% dari berat semen. Waktu ikat dari campuran pasta MSW – semen dan CCR – semen tidak banyak berbeda dengan pasta semen, tetapi lebih lama daripada pasta semen. Lamanya waktu ikat ini disebabkan oleh rendahnya kandungan C3S dan tingginya C2S bila dibandingkan dengan pasta semen Portland. Kuat tekan mortar dari bahan MSW lebih rendah dari mortar semen bila kadar MSW bertambah. Rendahnya kuat tekan ini disebabkan oleh kandungan CaO yang rendah dan SiO₂ yang tinggi di dalam MSW bila dibandingkan dengan CCR. Krammat & Tangtermsirikul (2004) semen dari bahan MSW dan CCR memiliki unjuk kerja yang lebih terhadap sulfat daripada semen normal. Hal ini disebabkan oleh rendahnya kandungan C3S dan C3A di dalam semen MSW dan CCR.

Penelitian sebelumnya telah banyak membahas tentang perilaku mekanika campuran kapur karbit dengan bahan lain seperti RHA, FA dan MSW baik dalam bentuk mortar dan pasta. Somna dkk. (2011) melakukan kajian terhadap pasta yang

terbuat dari bahan CCR dan campuran CCR-FA. Rasio berat CCR terhadap FA adalah 30:70. Untuk menghasilkan pasta bahan tersebut dicampur air dengan perbandingan air dan bahan ikat (*water-to-binder*, w/b) sebesar 0,3; 0,4; dan 0,5. Pasta tersebut dicetak dalam cetakan silinder plastik berukuran diameter 30 mm dan tinggi 60 mm. Setelah umur 7, 14, 28, 42, dan 60 hari, pasta diuji kuat tekan yang mengacu pada ASTM D1633. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kuat tekan meningkat seiring dengan umur benda uji. Tanpa menggunakan semen portland, pasta CCR-FA dengan w/b 0,3 dapat menghasilkan kuat tekan hingga 8,5 MPa dan 9,2 MPa masing-masing pada umur 28 dan 60 hari. Benda uji dengan w/b 0,3 dan 0,5 memiliki kuat tekan yang tertinggi dan terendah. Hasil ini mengindikasikan bahwa rasio w/b merupakan faktor penting yang mempengaruhi kuat tekan pasta CCR-FA sebagaimana terjadi pula pada pasta semen. Keberadaan CSH dalam pasta CCR-FA meningkatkan kuat tekan pasta.

2.3 KUAT DUKUNG TANAH DASAR

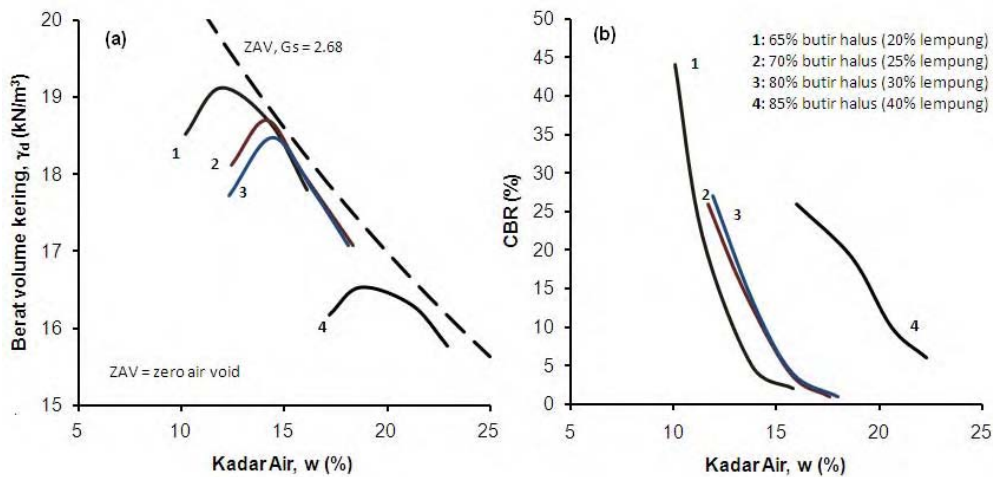
Pemadatan tanah dasar berkaitan erat dengan peningkatan kuat dukung tanah. Untuk tanah dasar jalan, nilai kuat dukung tanah lebih sering diukur dengan nilai *California Bearing Ratio (CBR)*. Nilai *CBR* ini digunakan untuk perencanaan tebal lapisan perkerasan jalan. Untuk menentukan nilai *CBR* ini diperlukan pengujian *CBR* di laboratorium atau dapat diperkirakan berdasarkan Tabel 2.1. Nilai *CBR* lebih dipengaruhi oleh variasi kadar air tanah, sehingga untuk perencanaan ditetapkan nilai *CBR* pada nilai kadar air yang tetap. Tutumler dan Thompson (2005) melakukan pengujian *CBR* terhadap empat jenis tanah dengan variasi kandungan lempung (Gambar 2.1).

Dalam penerapannya bilamana pengaruh kadar air pemadatan terhadap *CBR* relatif kecil, seperti pada tanah non-kohefif, bahan berbutir-kasar, maka nilai *CBR* dapat ditentukan pada pemadatan dengan kadar air optimum. Pada beberapa pekerjaan, nilai *CBR* rencana ditetapkan berdasar variasi berat volume kering. Untuk itu, kadar air pemadatan dibuat tetap namun usaha pemadatan dibuat berbeda dengan cara mengubah jumlah tumbukan tiap lapisannya. Memperhatikan kondisi lingkungan, uji *CBR* rendaman (*soaked CBR*) biasanya dilakukan dengan merendam benda uji selama 4 hari. Melalui uji akan diperoleh dua parameter yaitu nilai *CBR* rendaman dan potensi pengembangan tanah dasah. Untuk jenis tanah lempung

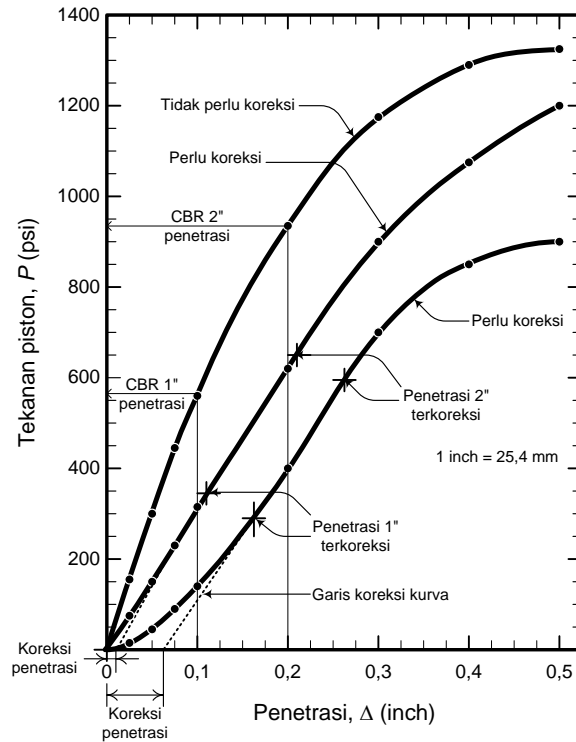
kembang, biasanya memiliki nilai CBR rendaman yang sangat rendah dibandingkan dengan CBR normal (tanpa rendaman). Prosedur pengujian CBR laboratorium dapat dilihat dalam standar uji ASTM D1883. Tipikal pembacaan hasil uji CBR ini adalah kurva hubungan tekanan dan penetrasi seperti Gambar 2.2.

Tabel 2. 1 Tipikal nilai CBR beberapa jenis tanah (Tutumler dan Thompson, 2005)

Jenis Tanah	Indeks Plastisitas (%)	CBR (%) kedalaman dibawah muka air tanah	
		≤ 600 mm	> 600mm
Lempung plastis	70	2	1
	60	2	1,5
	50	2,5	2
	40	3	2
Lempung berlanau	30	5	3
Lempung berpasir	20	6	4
	10	7	5
Lanau	-	2	1*
Pasir gradasi buruk	non-plastis	20	10
Pasir gradasi baik	non-plastis	40	15
Kerikil berpasir gradasi baik	non-plastis	60	20



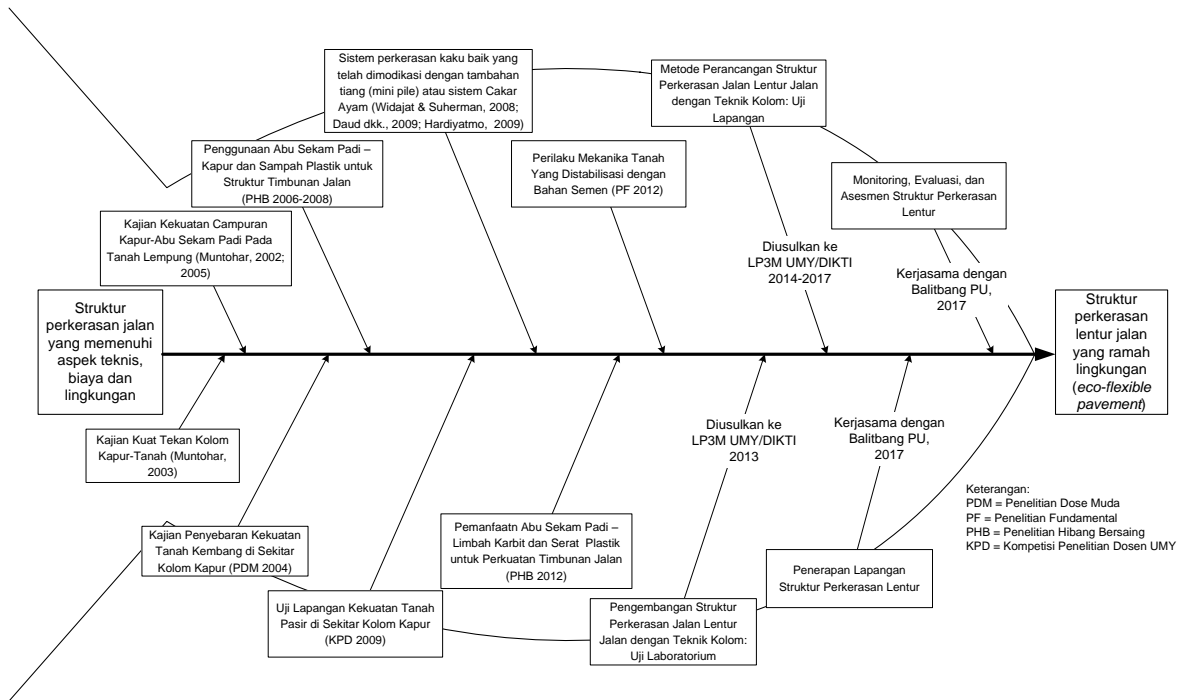
Gambar 2. 1 Hubungan antara pematatan dan nilai CBR (a) pematatan laboratorium, (b) hubungan kadar air – CBR (dianalisis ulang dan dimodifikasi dari Tutumler & Thompson, 2005)



Gambar 2. 2 Tipikal kurva tekanan dan penetrasi CBR (dimodifikasi dari ASTM D1883)

2.4 PETA JALAN PENELITIAN

Peta jalan penelitian dan technology (*research and technology road map*) untuk struktur perkerasan jalan ditunjukkan oleh *fishbone diagram* pada Gambar 2.3. Hasil akhir dari penelitian adalah struktur perkerasan lentur jalan yang ramah lingkungan atau *Eco-flexibel pavement*.



Gambar 2. 3 Peta jalan penelitian dan teknologi struktur perkerasan jalan ramah lingkungan (*eco-flexible pavement*)

BAB 3. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

3.1 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengkaji model teknik kolom untuk fondasi perkerasan lentur. Karakteristik kekuatan dan deformasi serta ketahanan dari teknik kolom dikaji di laboratorium dan lapangan. Secara rinci tujuan penelitian dapat diuraikan sebagai berikut ini.

Tujuan Penelitian Tahun ke-1 :

- (1) mengkaji susunan kolom yang memberikan kuat dukung tanah yang tinggi.
- (2) mengkaji karakteristik beban dan deformasi vertikal tanah dasar sebelum dan setelah pemasangan teknik kolom di laboratorium.

Tujuan Penelitian Tahun ke-2 :

- (1) menerapkan teknik kolom pada perkerasan lentur jalan di atas tanah ekspansif.
- (2) mempelajari karakteristik tekanan ekspansif tanah di sekitar kolom dan di bawah lapis perkerasan.

Tujuan Penelitian Tahun ke-3 :

- (1) mempelajari perubahan kuat dukung dan deformasi sistem kolom pada perkerasan lentur jalan terhadap perubahan waktu.
- (2) menyusun rancangan struktur perkerasan jalan di atas tanah ekspansif yang memenuhi aspek teknis, ekonomis, dan lingkungan.

3.2 MANFAT PENELITIAN

Struktur perkerasan jalan di atas tanah ekspansif harus memenuhi aspek teknis, ekonomis, dan lingkungan. Untuk itu diperlukan suatu rancangan struktur perkerasan jalan yang memenuhi tiga aspek tersebut. Untuk itu struktur perkerasan perlu yang dirancang seperti halnya perancangan pelat-kolom, sehingga dimensi lapis perkerasan dan kolom dirancang berdasar beban lalu-lintas rancangan yang paling kritis. Sistem perkerasan teknik kolom perlu dirancang kuat menahan momen, gaya lintang dan geser pons, sehingga pengaruh beban-beban tambahan seperti: beban akibat vibrasi tanah-dasar dan naik-turunnya tanah-dasar akibat ekspansif susut

tanah-dasar dapat diperhitungkan dalam perancangan. Muntohar (2006) secara khusus menyebutkan bahwa konstruksi jalan di atas tanah ekspansif menyebabkan kerusakan di beberapa ruas jalan nasional, provinsi, dan kabupaten di wilayah Yogyakarta. Permasalahan yang sering dijumpai pada konstruksi yang dibangun di atas tanah lunak dan tanah ekspansif adalah penurunan tanah yang besar saat basah yang menyebabkan kuat dukung tanah yang sangat rendah, dan susut yang tinggi saat kering yang menyebabkan retakan pada tanah dasar dan permukaan perkerasan jalan. Untuk itu sistem fondasi untuk perkerasan jalan hendaknya memiliki kinerja yang lebih baik ditinjau dari aspek teknis (strength, stiffness, serviceability, stability, dan durability), maupun aspek ekonomisnya yang mencakup investasi awal dan biaya perawatan jangka panjang selama dioperasikan.

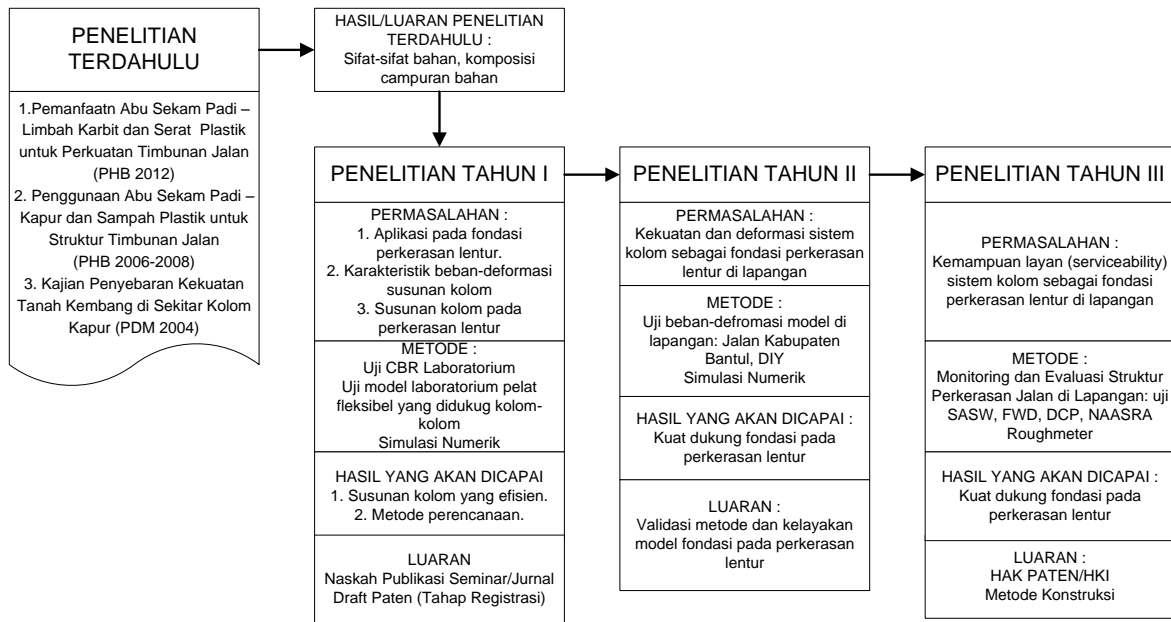
Pada tanah ekspansif, struktur perkerasan jalan harus mampu menahan tekanan ekspansif (swelling pressure) dari lapisan tanah dasar di bawah lapis perkerasan. Untuk itu, teknik perbaikan tanah dengan metode kolom juga harus mampu mengurangi tekanan ekspansif dan sifat ekspansif-susut tanah. Kajian awal yang dilakukan oleh Budi (2003), Muntohar (2006) dan Tonoz dkk., (2005) telah menunjukkan bahwa teknik kolom kapur telah mampu mengurangi sifat ekspansif-susut dan tekanan ekspansif tanah. Dengan demikian jarak antar kolom serta bahan pengisi kolom perlu dikaji agar memenuhi aspek teknis. Agar memenuhi aspek ekonomis dan lingkungan, maka diperlukan komposisi yang sesuai antara campuran limbah karbit dan abu sekam padi sebagai bahan pengisi kolom.

BAB 4. METODE PENELITIAN

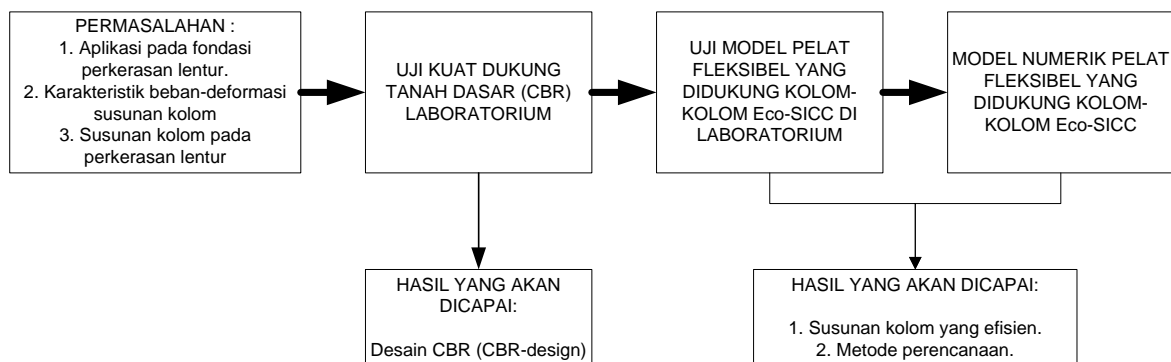
4.1 KERANGKA PENELITIAN

Penelitian ini direncanakan untuk kurun waktu tiga tahun yang meliputi tahap pengujian model laboratorium pada Tahun I, tahap pengujian model di lapangan (*full scale*) pada Tahun II, dan pada Tahun III merupakan tahap monitoring serta evaluasi struktur perkerasan jalan. Secara umum kerangka penelitian untuk keseluruhan seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1. Pada Tahun Pertama penelitian dilakukan di Laboratorium Geoteknik Jurusan Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. terdiri atas tiga kajian pokok seperti digambarkan oleh diagram pada Gambar. 4.2. yaitu :

- (1) Uji kuat dukung tanah yang ditopang oleh kolom dari campuran kapur karbit dan abu sekam padi dengan metode CBR laboratorium,
- (2) Pengujian model laboratorium pelat fleksibel yang ditopang oleh kolom-kolom dari campuran kapur karbit dan abu sekam padi. Pengujian ini dilakukan untuk modulus reaksi tanah dasar dan kolom berdasarkan hubungan beban defleksi. Pengujian dilaksanakan setelah kolom berumur 3 hari. Untuk mengevaluasi sistem ini maka diperlukan pengujian model struktur perkerasan lentur itu sendiri. Pengujian terhadap model struktur perkerasan lentur dilakukan untuk menentukan kuat dukung struktur perkerasan lentur yang didukung oleh kolom-kolom.
- (3) Simulasi numerik pelat fleksibel yang ditopang oleh kolom-kolom dari campuran kapur karbit dan abu sekam padi. Uji beban pelat dilakukan guna mengetahui hubungan beban dan lendutan yang nantinya dinyatakan dalam modulus reaksi tanah dasar (k).



Gambar 4. 1 Kerangka penelitian dalam kurun waktu tiga tahun



Gambar 4. 2 Tahapan penelitian pada Tahun Pertama

4.2 TAHAPAN PENELITIAN TAHUN PERTAMA

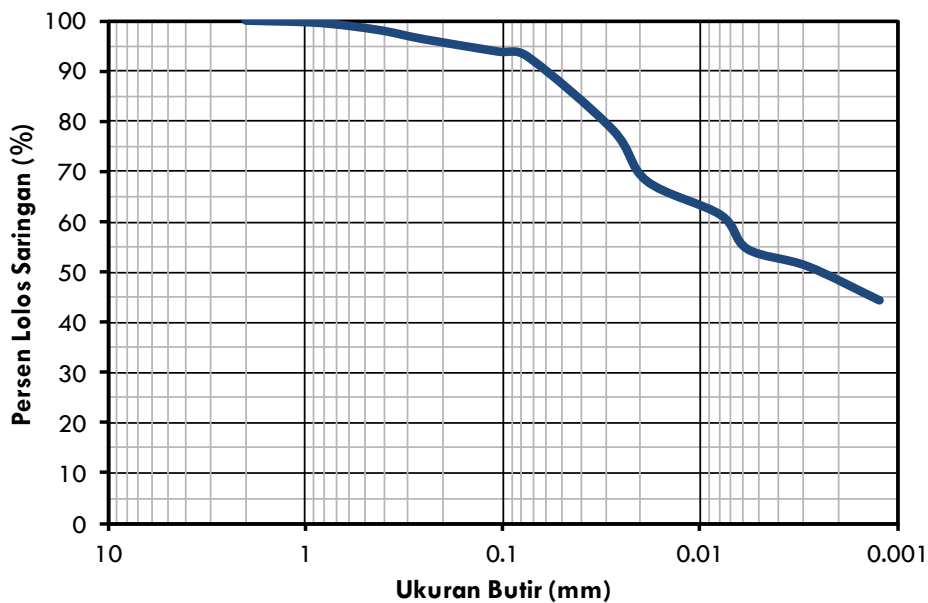
4.2.1 Bahan dan Alat

Tanah

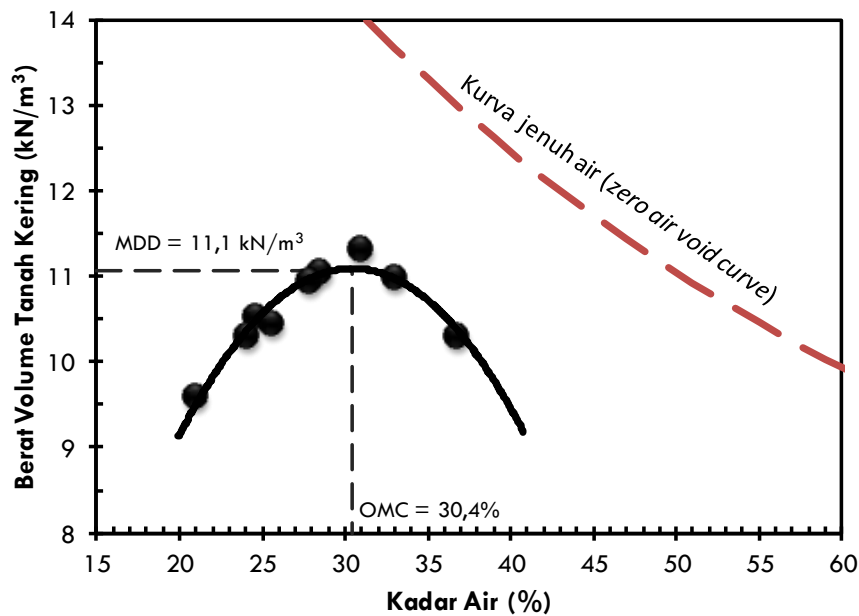
Tanah yang digunakan dalam pengujian merupakan tanah lempung yang berasal dari Desa Bangunjiwo, Kecamatan Kasihan, Kabupaten Bantul, Yogyakarta. Tabel 4.1 menyajikan hasil pemeriksaan awal terhadap sifat-sifat tanah yang digunakan. Gradasi butiran tanah yang ditunjukkan pada kurva distribusi ukuran butir (Gambar 4.3). Sifat pemadatan tanah pada Proctor standar ditunjukkan oleh kurva pemadatan pada Gambar 4.4.

Tabel 4. 1 Hasil Pemeriksaan Karakteristik Tanah

Parameter	Nilai
Berat jenis, G_s	2,59
Ukuran butir tanah :	
Pasir (19,05 mm–75 μ m)	14%
Lanau (75–2 μ m)	65%
Lempung (< 2 μ m)	21%
D_{50}	27 μ m
Batas-batas Atterberg:	
Batas cair, LL	73%
Batas plastis, PL	40%
Indek plastisitas, PI	32%
Klasifikasi USCS	CH
Pemadatan Proctor standar:	
Berat unit kering maksimum, MDD	11,1 kN/m ³
Kadar air optimum, OMC	30,4%
Kuat tekan bebas	175,3 kPa
CBR :	
Tanpa rendaman	2,6% – 3,0%
Dengan rendaman	< 1%



Gambar 4.3 Kurva distribusi ukuran butir tanah



Gambar 4.4 Kurva pemadatan Proctor standar untuk tanah

Kapur Karbit dan Abu Sekam Padi

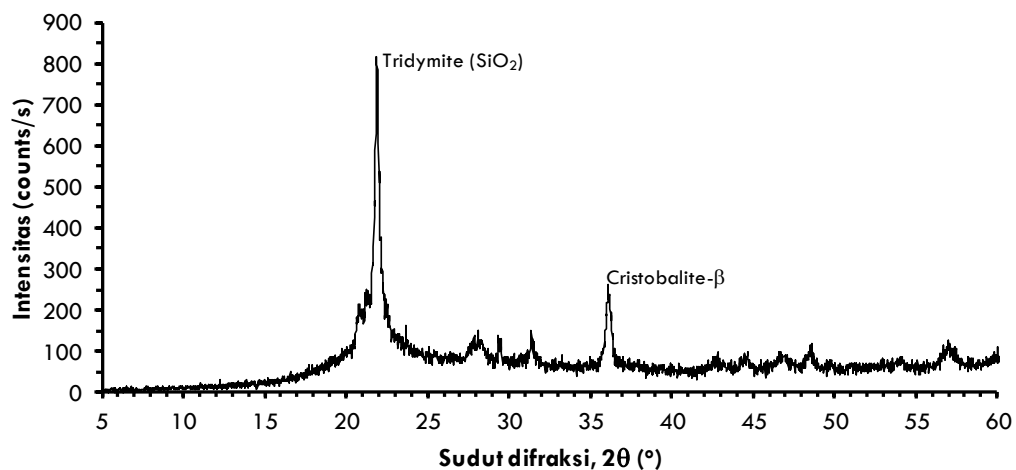
Bahan Eco-SiCC dibuat dari campuran kapur karbit dan abu sekam padi. Kapur karbit diperoleh dari limbah karbit yang digunakan adalah sisa dari industri electroplating PT. Indo Hanzel Perkasa, Sedayu, Bantul, D.I. Yogyakarta. Abu sekam padi yang digunakan merupakan sisa dari pembakaran sekam padi di daerah Godean, Yogyakarta. Sebelum digunakan, abu sekam padi disaring melalui saringan No. 4 (0,425 mm) guna memisahkan partikel selain abu atau fraksi tanah lainnya. Untuk menghasilkan bahan berupa bubuk (*powder*), karbit dan abu sekam padi tersebut dihaluskan secara terpisah dalam mesin *Los Angeles Abrasion Test* selama 2 jam. Sebelum dihaluskan, limbah karbit dan abu sekam padi dikeringkan pada suhu 40°C selama 24 - 48 jam. Proses penghalusan menggunakan besi-besi baja tulangan ulir diameter 13 mm dengan panjang 30 cm berjumlah 40 batang.. Untuk mengurangi proses hidrasi, limbah karbit dan abu sekam padi yang telah halus disimpan dalam kantong plastik kedap air.

Berdasarkan hasil uji unsur kimia (Tabel 4.2) dengan metode *Atomic Absorption Spectroscopy*, limbah karbit mengandung 58% unsur CaO, 9% unsur Al₂O₃, 1% unsur Fe₂O₃, 3% unsur SiO₂ dan 29% *loss on ignition* (LOI), sedangkan abu sekam padi mengandung 88% SiO₂, 1% Al₂O₃, 0,5% CaO, 1% unsur Fe₂O₃ dan 8% LOI. Mengacu pada kriteria ASTM C1240, tingkat aktivitas pozzolanik adalah kumulatif

dari unsur SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 dengan batas minimum 85%. Untuk abu sekam padi, ketiga unsur oksida tersebut berjumlah 89,5% sehingga memenuhi persyaratan sebagai pozzolan. Mineral utama penyusun abu sekam padi adalah Tridymite yang mengandung *amorphous silica* (SiO_2) seperti ditunjukkan oleh diagram difraksi sinar-X pada Gambar 4.5. Sedangkan kapur karbit mengandung mineral utama berupa *calcium hydroxide* (Ca(OH)_2) seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6.

Tabel 4. 2 Sifat-sifat fisika dan komposisi kimia abu sekam padi dan kapur karbit

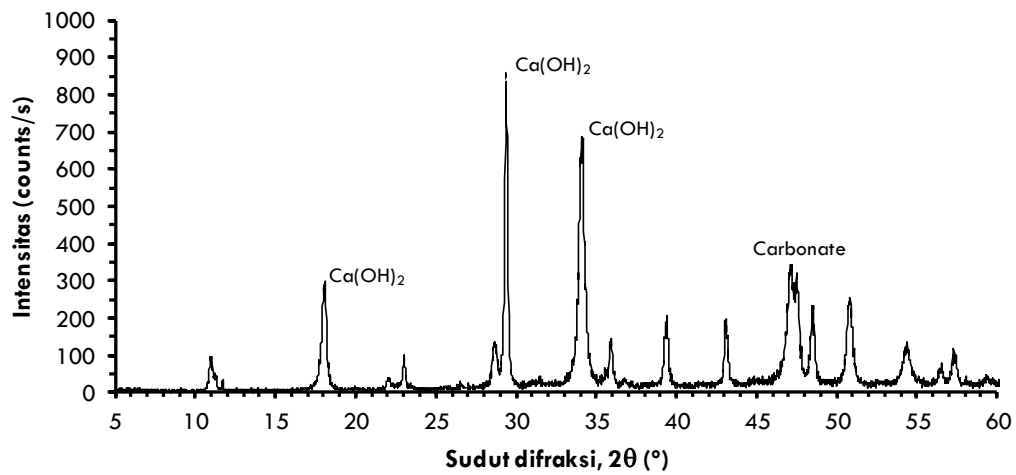
Komponen	Abu Sekam Padi	Kapur Karbit
<i>Sifat-sifat fisika :</i>		
Berat jenis	2,16	2,02
Berat tertahan saringan 45- μm	5,13	5,25
($\%$)		
<i>Komposisi kimia ($\%$) :</i>		
Al_2O_3	1,17	8,95
CaO	0,48	58,00
Fe_2O_3	0,98	0,11
MgO	0,13	0,10
Na_2O	0,22	0,01
K_2O	1,54	0,03
SiO_2	87,68	2,31
SO_3	0,39	0,21
LOI	7,78	31,02



Gambar 4.5 Diagram difraksi sinar-X untuk abu sekam padi

Pelat

Sistem pelat fleksibel menggunakan dua jenis pelat yaitu pelat baja



Gambar 4.6 Diagram difraksi sinar-X untuk kapur karbit

Alat-Alat Utama

Alat-alat utama yang digunakan untuk penelitian pada Tahun Pertama meliputi :

- a) **Alat uji CBR**, berupa mesin penetrasi (*loading machine*) dilengkapi alat pengukur beban berkapasitas sekurang – kurangnya 4,45 ton dengan kecepatan penetrasi sebesar 1,27 mm/menit (dapat dilihat pada Gambar 4.7). Mesin dilengkapi dengan cincin beban (*proving ring*) dan arloji ukurnya serta arloji ukur deformasi. Silinder pemadatan CBR dengan diameter 6 in. dan tinggi 7 in., dilengkapi dengan silinder sambungan tinggi 2 in., dan pelat alas tebal 3/8 in. yang berlubang-lubang.

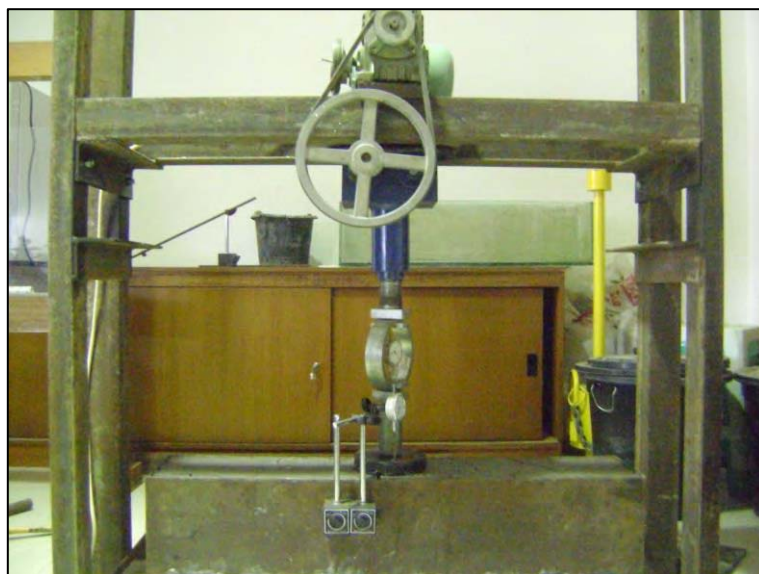


Gambar 4.7 Mesin uji penetrasi dan Silinder pemadatan CBR beserta kelengkapan



Gambar 4. 8 Pelat berlubang (*perforated plate*) dan tripod beserta arloji ukur

- b) Alat uji model fondasi dilakukan di laboratorium dengan skala pemodelan adalah skala dimensi panjang (*L-dimension*) 1:10. Alat utama yang digunakan adalah kotak model tanah tanah dasar yang dilengkapi dengan rangka untuk uji pembebanan (Gambar 4.8). Mesin penekan (*loading cell*) dilengkapi dengan proving ring memiliki kapasitas 50 kN dan digerakkan secara mekanis dengan motor elektrik. Kecepatan pembebanan yang diberikan kepada benda uji selama pengujian berlangsung adalah 1 mm/menit. Model tanah dasar dibuat dengan ukuran sebagai berikut : (a) lebar = 20 cm, (b) panjang = 100 cm, dan (c) tinggi, $h = 20$ cm.

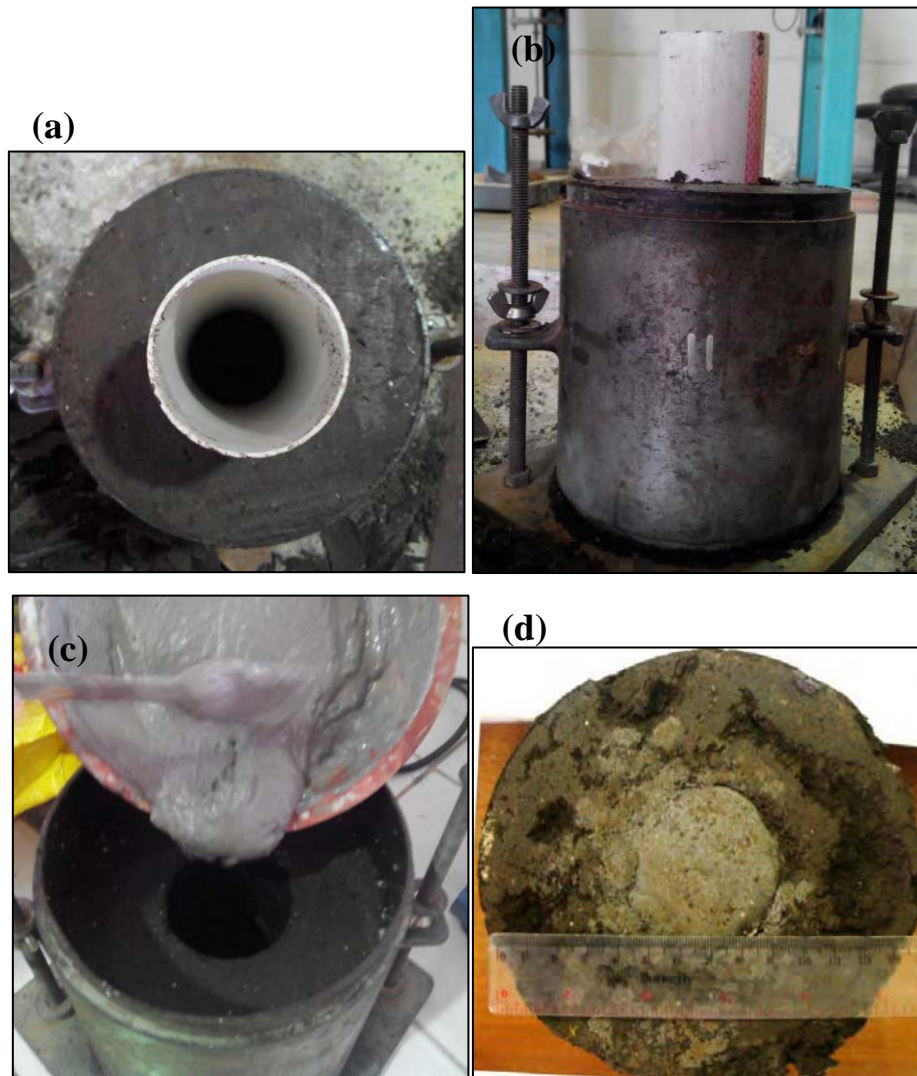


Gambar 4.9 Skema pengaturan pengujian beban model fondasi pada kerangka beban (*loading frame*)

4.2.2 Uji CBR Laboratorium

Pembuatan benda uji

Sejumlah tanah kering 3-4 kg dicampur dengan air pada untuk menghasilkan kepadatan yang berbeda-beda. Kemudian dipadatkan dalam silinder CBR yang di bagian tengahnya telah diberi pipa PVC berdiameter 2". (Gambar 4.10a dan 4.10b). Kolom Eco-SiCC dibuat dari pasta campuran kapur karbit dan abu sekam padi yang dimasukkan ke dalam lubang yang telah dibentuk seperti pada Gambar 4.10c. Setelah pasta mengeras (Gambar 4.10d), benda uji disimpan selama satu hari untuk selanjutnya dilakukan uji pengembangan dengan cara rendaman.



Gambar 4. 10 Pembuatan benda uji CBR (a)-(b) pemadatan tanah dalam silinder dan lubang kolom, (c) pembuatan kolom dengan pasta Eco SiCC, (d) kolom yang telah mengeras.

Prosedur uji CBR

Pengujian CBR laboratorium dilakukan pada sampel tanah dengan rendaman. Sebelum dilakukan uji penetrasi, benda uji direndam selama 4 hari untuk menentukan pengembangan tanah (Gambar 4.11). Pengembangan S dihitung setiap hari yang merupakan perbandingan perubahan deformasi benda uji (δ) dan tinggi benda uji awal (H_o) seperti pada persamaan 4.1. pelat beban di atas tanah yang berada di dalam silinder, dengan jumlah beban yang sesuai dengan tekanan (berat lapisan perkerasan) yang akan bekerja pada tanah nantinya, tetapi sekurang-kurangnya 2 buah pelat beban (jumlah beratnya $2 \times 5 \text{ lbs} = 10 \text{ lbs}$).

$$S = \frac{\delta}{H_o} \times 100\% \quad (4.1)$$

dengan,

S = pengembangan tanah (%),

δ = deformasi benda uji (mm), dan

H_o = tinggi benda uji awal (mm).



Gambar 4.11 Benda uji yang direndam sebelum uji penetrasi CBR.

California Bearing Ratio (CBR) didefinisikan sebagai suatu perbandingan antara beban percobaan (*test load*) dengan beban standar (*standard load*) dan dinyatakan dalam persen. Hasil pengujian dapat diperoleh dengan mengukur besarnya beban pada penetrasi tertentu. Penetrasi dapat dihitung menggunakan persamaan 4.2 dan

4.3. Prosedur pengujian CBR mengikuti standar ASTM D1883 - 07e2. Uji penetrasi seperti digambarkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4. 12 Uji penetrasi CBR setelah uji rendaman

Penetrasi 0,1" (2,5 mm) :

$$CBR_{0,1''} = \frac{P}{3 \times 1000} \times 100\% \quad (4.2)$$

Penetrasi 0,2" (5 mm) :

$$CBR_{0,2''} = \frac{P}{3 \times 1500} \times 100\% \quad (4.3)$$

dengan, P = gaya pada penetrasi 0,1" dan 0,2" dalam satuan *pounds (lbs)*.

Nilai CBR yang digunakan dan dilaporkan adalah nilai $CBR_{0,1''}$. Apabila dalam pelaksanaan ternyata nilai $CBR_{0,2''}$ lebih besar dari pada nilai $CBR_{0,1''}$, maka pengujian harus diulang. Dan apabila ternyata pada percobaan ulangan ini, nilai

$CBR_{0.2}$ tetap lebih besar dari nilai $CBR_{0.1}$, maka nilai CBR yang digunakan adalah nilai $CBR_{0.2}$.

4.2.3 Pemodelan Laboratorium

Pada tahap ini akan dilakukan pengujian laboratorium terhadap model kolom yang dimaksudkan untuk mengkaji pengaruh ukuran dan susunan kolom terhadap beban dan penurunan, dan modulus reaksi tanah. Bahan kolom terbuat dari campuran limbah karbit dan abu sekam padi. Pada penelitian ini kolom-kolom ini mendukung perkerasan jalan yang dimodelkan dengan pelat lentur (*flexible plate*). Pelat dan kolom diuji di atas tanah ekspansif yang diletakkan dalam kotak uji seperti Gambar 4.13. Tanah dasar berupa lempung dipadatkan dalam kotak model pada derajat kepadatan 95% MDD pada kondisi optimum kering. Kolom-kolom berpenampang lingkaran diameter 0,05 m dan panjang 0,1 m. Kolom dibuat dari pasta campuran mikrosilika dan mikrokalsium yang berasal dari abu sekam padi dan kapur karbit. Gambar 4.14 menyajikan gambar kolom yang telah dipasang pada kotak model.



Gambar 4.13 Kotak model berisi tanah yang telah dipadatkan.



Gambar 4.14 Pembuatan kolom-kolom pada tanah yang dipadatkan pada kotak model

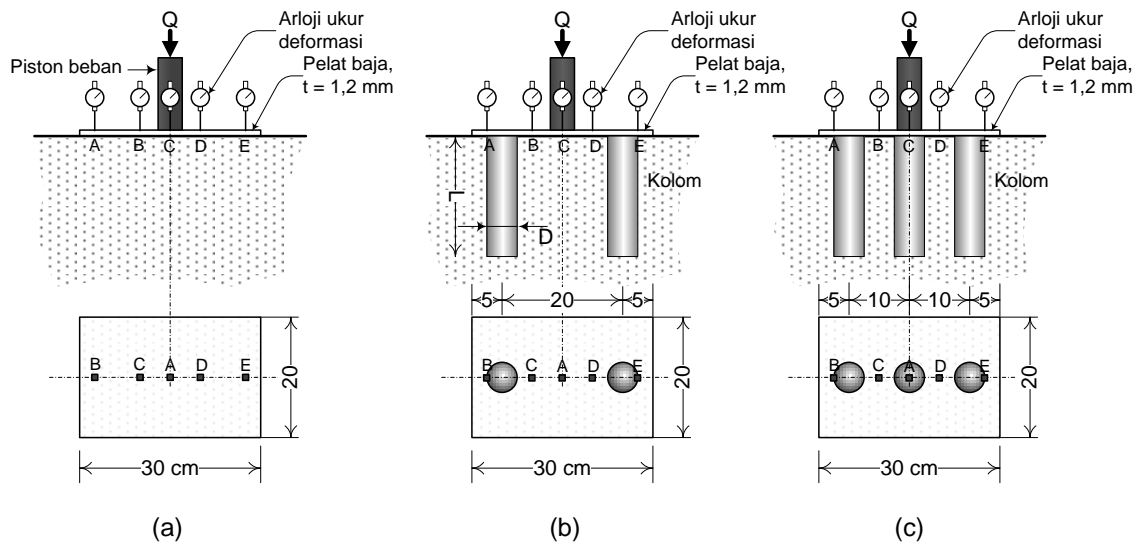
Uji beban pada pelat fleksibel dilakukan dengan dua variasi model pelat yaitu pelat baja tipis dan pelat *acrylic flexiglass*. Variasi susunan kolom dan pelat seperti ditunjukkan pada Gambar 4.15 dan 4.16. Pelat model fondasi dari pelat baja memiliki ketebalan 1,2 mm dan modulus elastisitas (E) sebesar $8,3 \times 10^6$ kPa. Dalam pengujian ini pelat dibuat berukuran 0,3 m x 0,2 m, sehingga pelat memiliki kekakuan (EI) sebesar $2,4 \times 10^{-4}$ kN.m². Sedangkan model fondasi dari pelat *acrylic flexiglass* memiliki tebal 5 mm dengan modulus elastisitas (E) sebesar $2,98 \times 10^6$ kPa. Ukuran pelat *acrylic flexiglass* yaitu 0,125 m x 0,125 m; 0,4 m x 0,125 m; dan 0,8 m x 0,125 m. Pengujian beban dilakukan setelah kolom berumur 7 hari. Uji beban pelat dilakukan pada. Beban diberikan secara terpusat di tengah-tengah pelat melalui piston elektrik yang ditahan oleh rangka baja. Pembebanan dilakukan secara bertahap hingga mencapai keruntuhan. Sebelum pengujian beban, tanah dalam kotak model digenangi air selama 6 hari untuk mengamati pengembangan dan tekanan pengembangan tanah. Pengembangan diamati dari sejumlah arloji ukur (*dial gauge*) yang dipasang. Sedangkan, tekanan pengembangan diukur dari arloji ukur pada *proving ring* beban. Sejumlah arloji pengukur deformasi (*dial gauge*) diletakkan di 5 titik di atas pelat. Letak titik beban adalah di pusat pelat (titik A) dan dan arloji pengukur deformasi pada jarak-jarak diantara kolom-kolom yaitu di titik-titik A

hingga I seperti pada Gambar 4.15 dan 4.16. Pengaturan uji beban pada pelat yang didukung kolom-kolom dilibatkan dalam Gambar 4.17.

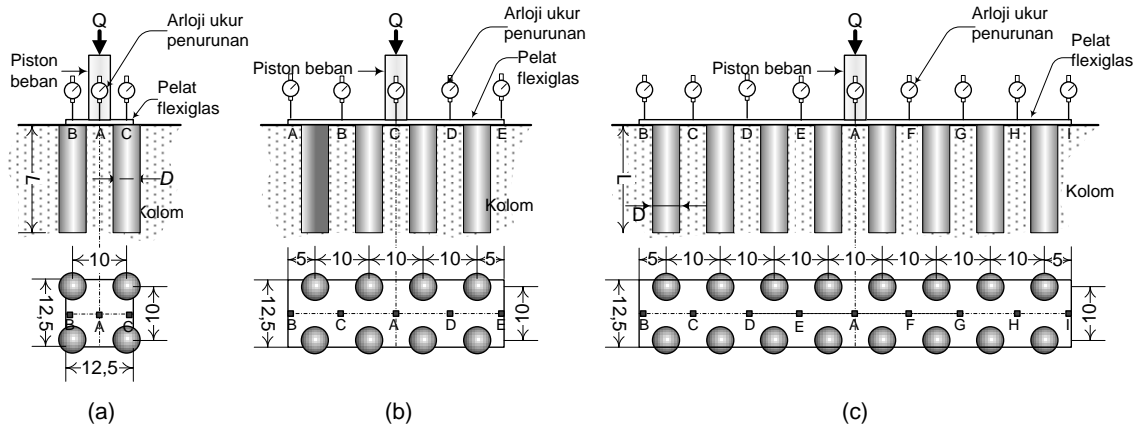
Modulus reaksi tanah dan kolom untuk setiap susunan kolom dan tebal pelat dihitung dengan persamaan (4.4) berikut :

$$k = \frac{q}{\delta_a} \quad (4.4)$$

dengan q = tekanan pada pelat = Q/A , Q = beban titik, A = luas pelat, δ_a = defleksi rata-rata pelat = $\delta_a = \frac{1}{2L} [l_i (\delta_i + \delta_{i+1}) + l_{i+1} (\delta_{i+1} + \delta_{i+2}) + \dots + l_{n-1} (\delta_{n-1} + \delta_n)]$, L = panjang total pelat, δ_i = defleksi di titik ke- i dari pelat fleksibel, l_i = jarak antar titik, n = jumlah titik pengukuran defleksi (Hardiyatmo, 2009).



Gambar 4.15 Model sistem pelat fleksibel dari pelat baja yang didukung kolom-kolom (a) tanpa kolom, (b) dua kolom, (c) tiga kolom



Gambar 4.16 Model sistem pelat fleksibel dari pelat *acrylic fleksiglass* yang didukung kolom-kolom. (a) susunan 4 kolom, (b) susunan 8 kolom, dan (c) susunan 16 kolom



Gambar 4.17 Pengaturan arloji penolak ukur deformasi dan *proving ring*.

4.2.4 Pemodelan Numerik

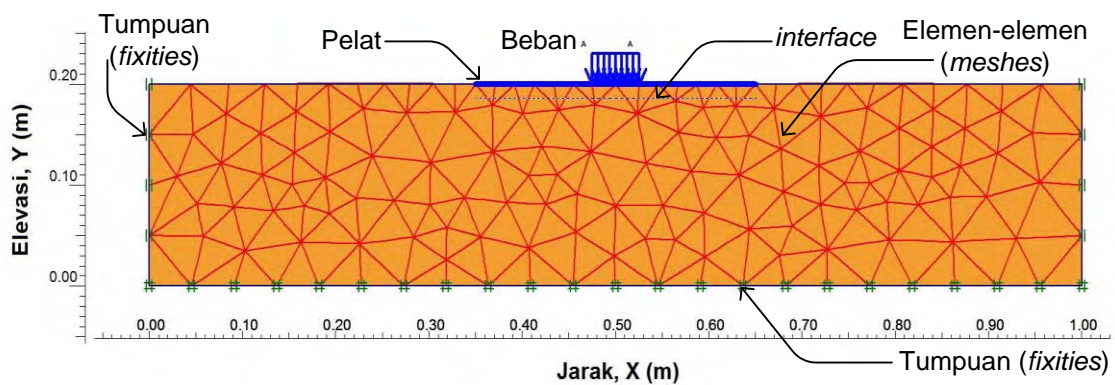
Parameter Model

Analisis numerik dengan menggunakan metode elemen hingga dilakukan untuk mengkaji perilaku beban – deformasi pelat dan kolom-kolom ketika menerima beban di atasnya. Model numerik menggunakan perangkat PLAXIS 2D Ver. 8.2. Pemodelan dilakukan untuk membandingkan beban dan deformasi vertikal hasil simulasi 2D dengan menggunakan PLAXIS 8.2. Geometri model 2D ditunjukkan pada Gambar 4.18. Jumlah elemen (*mesh*) yang digunakan pada mode 2D adalah 500 elemen. Untuk model elemen hingga, tanah dimodelkan dengan model *undrained Hardening Soil* (HS), dan pelat dengan model *linear-elastic*, serta material kolom dimodelkan sebagai *non-porous*. Pada model numerik ini, lapisan tanah dan struktur dimodelkan sebagai *plane-strain*. Data parameter kuat geser tanah diperoleh dari uji triaksial UU, dan modulus elastisitas kolom ditentukan dari uji kuat tekan bebas. Nilai modulus elastisitas kolom $E_{ref} = 5,5 \times 10^5$ kPa dan angka poisson $\nu = 0,3$. Parameter tanah yang digunakan untuk model PLAXIS disajikan pada Tabel 4.3. Parameter nilai-nilai modulus elastisitas (E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} , E_{ur}^{ref}) ditentukan dengan cara *trial and error*. Untuk masukan awal, nilai-nilai tersebut diperkirakan dari kurva tekanan dan defleksi hasil pengamatan laboratorium. Tahapan pembebanan dalam PLAXIS dilakukan dengan mengikuti tahapan pembebanan pada data uji beban laboratroium. Kemudian keluaran perhitungan PLAXIS digambarkan dalam kurva tekanan dan defleksi pelat. Hasil penggambaran ini dibandingkan terhadap hasil uji beban labortorium. Bila didapatkan hasil kurva teakanan dan defleksi yang berbeda cukup besar maka perhitungan PLAXIS diulangi dengan menyesuaikan nilai-nilai modulus elastisitas lapisan tanah. Analisis dilakukan berulang-ulang secara sistematis hingga kurva tekanan dan defleksi dari hasil analisis PLAXIS sama dengan atau cocok (*match*) dengan kurva uji beban laboratorium. Nilai-nilai E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} , E_{ur}^{ref} yang disajikan pada Tabel 4.3 merupakan hasil terbaik (*best-fit*) dari analisis balik PLAXIS.

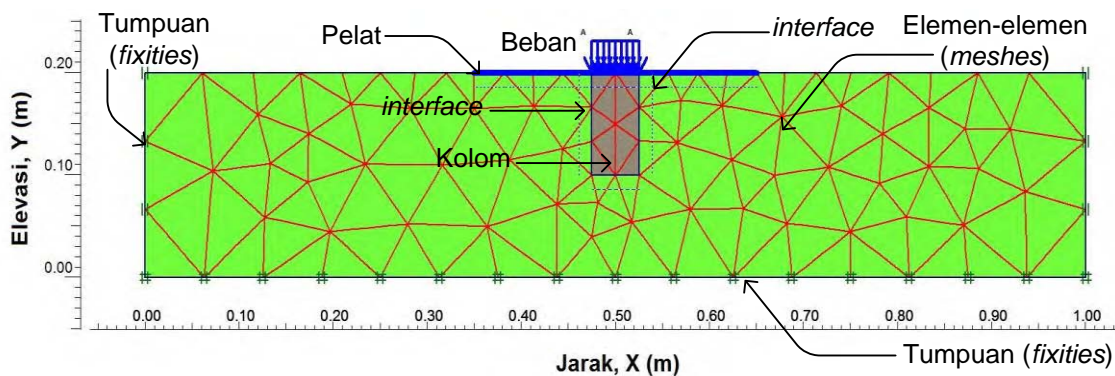
Penghitungan Model Numerik

Kondisi awal tegangan-tegangan dalam tanah (*initial condition*) dihitung dengan menggunakan prosedur K_0 (K_0 -*procedure*) dan tekanan air dihitung secara langsung

berdasarkan tekanan freatik. Penghitungan prosedur iterasi dilakukan sebagai *plastic calculation* dengan pengaturan standar dalam PLAXIS. Penghitungan dibagi menjadi dua tahap yaitu (1) aktivasi kolom-kolom dan pelat pada tahap konstruksi *stage of construction*, dan (2) pembebanan yang menggunakan *multiplier increment*. Pada tahapan multiplier increment, beban diberikan bertahap yaitu 25%, 50%, 75%, dan 100% dari beban maksimum hasil uji model laboratorium.

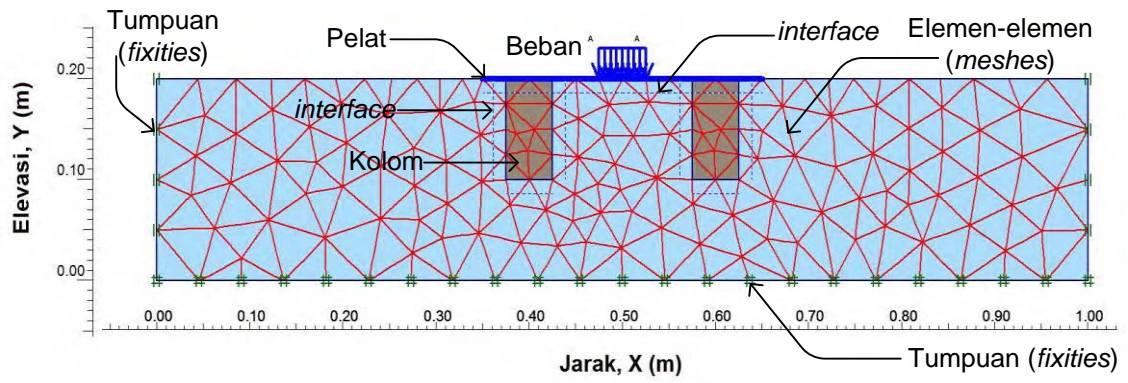


(a)

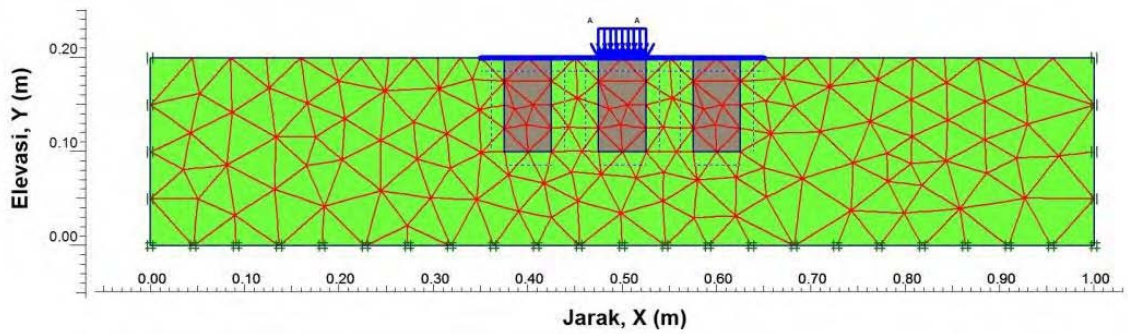


(b)

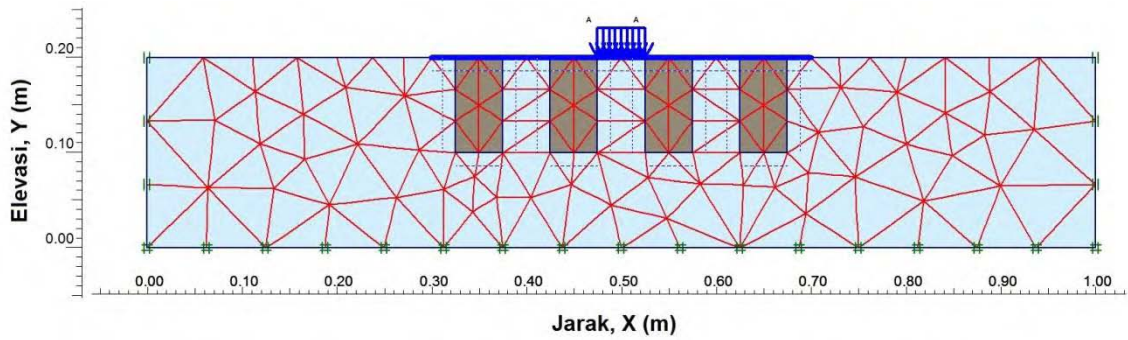
Gambar 4. 18 Pemodelan sistem fondasi pelat fleksibel dan kolom-kolom dengan PLAXIS 8.2 (a) pelat tanpa kolom, (b) pelat dengan 1 kolom, (c) pelat dengan 2 kolom, (d) pelat dengan 3 kolom, (e) pelat dengan 4 kolom (f) pelat dengan 5 kolom, (g) pelat dengan 6 kolom, (h) pelat dengan 7 kolom, dan (i) pelat dengan 8 kolom.



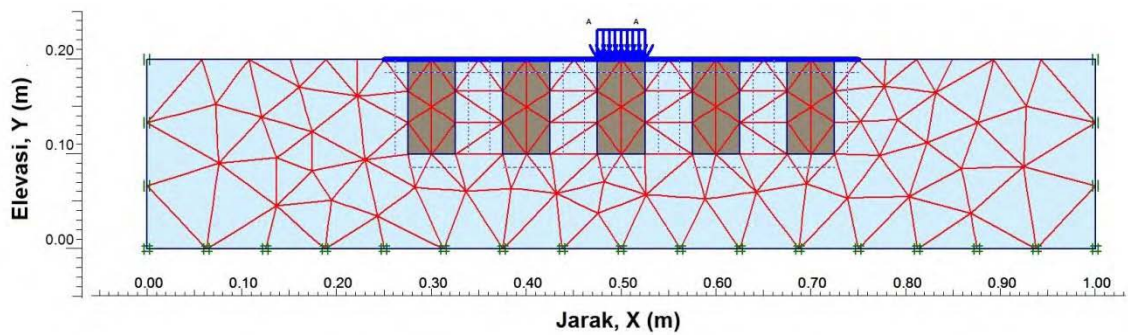
(c)



(d)

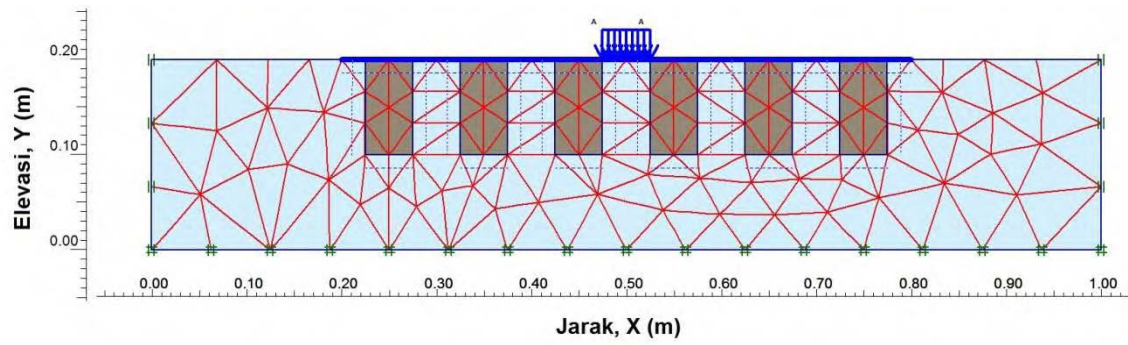


(e)

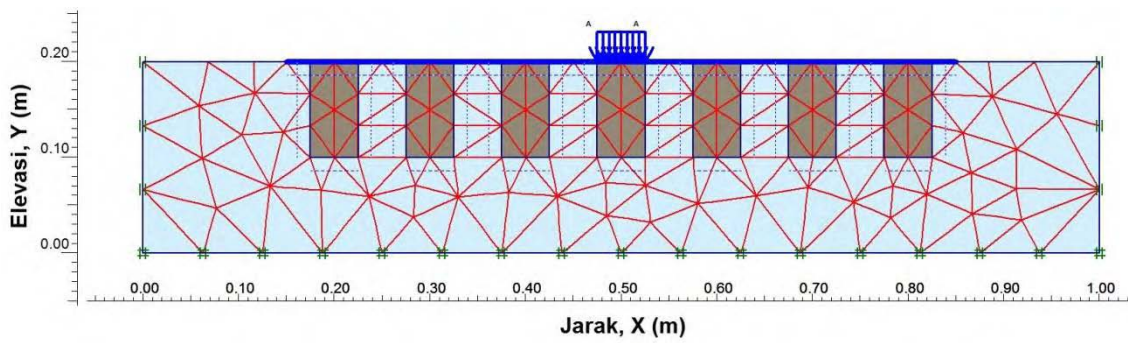


(f)

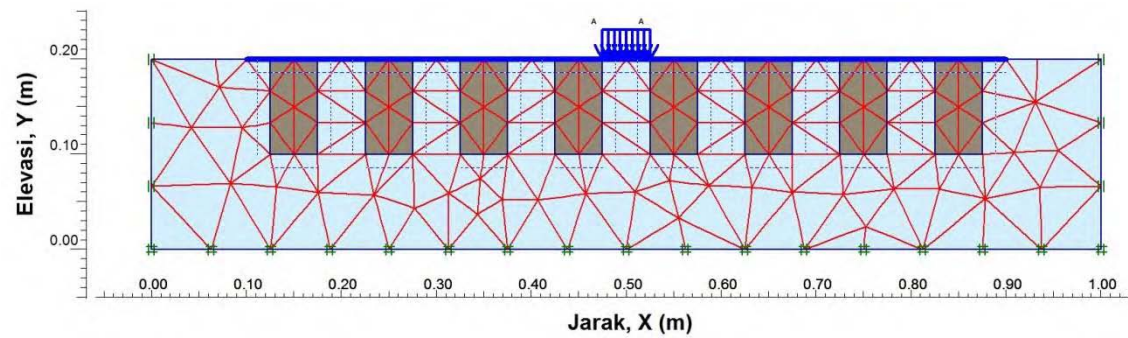
Gambar 4.18 Lanjutan



(g)



(h)



(i)

Gambar 4.18 Lanjutan

Tabel 4.3 Data parameter material yang digunakan dalam Plaxis 8.2

Nama/symbol	Model Laboratorium			Satuan
	Tanpa kolom	2 Kolom (K1)	3 Kolom (K2)	
Model material	Hardening Soil	Hardening Soil	Hardening Soil	-
Kondisi material	Undrained	Undrained	Undrained	
Berat volume kering γ_{unsat}	17	17	17	kN/m ³
Berat volume jenuh, γ_{sat}	20	20	20	kN/m ³
Modulus elastisitas, E_{50}^{ref}	718,75	3317,3	1437,5	kPa
Modulus elastisitas pemampatan, $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	575	2653,8	1150	kPa
Modulus elastisitas	3000	4000	4000	kPa

Nama/symbol	Model Laboratorium			Satuan
	Tanpa kolom	2 Kolom (K1)	3 Kolom (K2)	
<i>unloading/reloading, E_{ur}^{ref}</i>				
Angka poisson <i>unloading/reloading, ν_{ur}</i>	0,495	0,495	0,495	
Koefisien kekakuan, <i>m</i>	1	1	1	
Kohesi tanah, <i>c</i>	20	20	20	kPa
Sudut gesek internal tanah, ϕ	0	0	0	°
Interface, R_{inter}	1	1	1	-

4.2.5 Analisis Data

Dari pengujian CBR laboratorium diperoleh data nilai CBR dengan berbagai berat volum kering (γ_d) dan kadar air (w). Grafik hubungan antara nilai CBR, γ_d dan (w) dibuat untuk memperoleh grafik desain kuat dukung tanah dasar yang dipasang kolom Eco-SiCC.

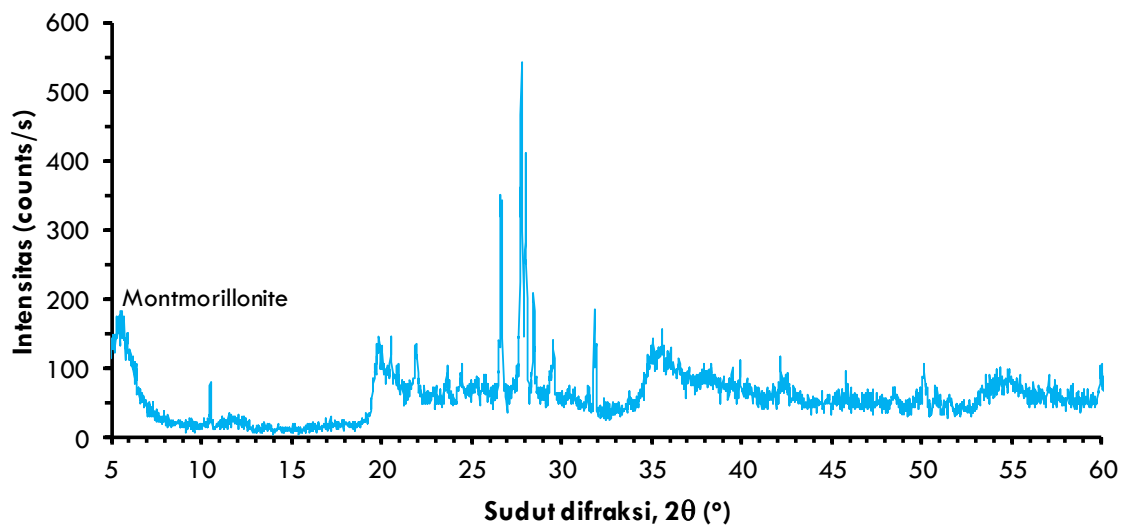
Dari uji beban langsung akan dihasilkan data berupa serta besarnya beban dan penurunan kolom yang mana dapat disajikan dalam suatu grafik hubungan beban - penurunan. Berdasarkan grafik ini akan dapat ditentukan kuat dukung maksimum yang mampu diterima oleh tanah untuk berbagai susunan kolom. Efektifitas susunan kolom dapat diketahui dari analisis perbandingan nilai kuat dukung maksimum dari masing-masing susunan kolom dalam suatu histogram.

BAB 5. HASIL YANG DICAPAI

5.1 HASIL PENELITIAN

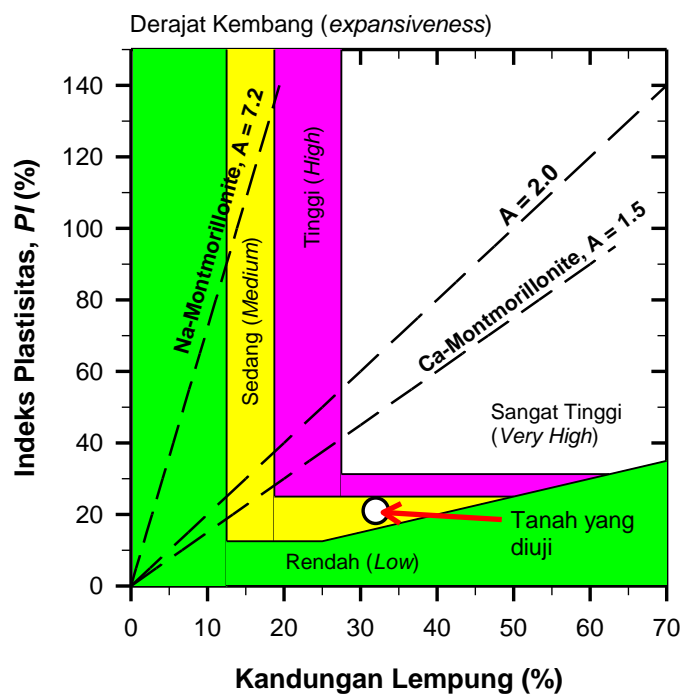
5.1.1 Sifat-Sifat Tanah Dasar

Tanah yang digunakan dalam penelitian memiliki kandungan fraksi halus (lempung/lanau) sebanyak 86% dan fraksi kasar (pasir) sebanyak 14%. Dengan demikian, tanah dikategorikan sebagai tanah berbutir halus karena tanah yang berukuran kurang dari 75 μm lebih besar dari 50%. Tanah memiliki nilai batas cair (LL) = 73%, batas plastis (PL) = 40%, dan indeks plastisitas (PI) = 32%. Menurut sistem klasifikasi tanah *USCS* (ASTM Standard D2487, 2011) maka tanah yang digunakan termasuk tanah lempung plastisitas tinggi dengan simbol *CH*. Pengujian mineral dengan uji difraksi sinar-X yang dilakukan untuk mengidentifikasi jenis mineral lempung yang terdapat di dalam tanah. Gambar 5.1 menyajikan pola difraksi sinar-X dari tanah lempung yang digunakan. Mineral utama lempung adalah *montmorillonite* dengan persentase mencapai 85%, dengan jenis *sodium-montmorillonite*. Mineral penyusun lainnya adalah *vermiculite* dan *quartz* yang mencapai 15%. Kedua mineral *montmorillonite* dan *vermiculite* memiliki sifat kembang-susut terhadap air dan perubahan suhu (Muntohar, 2009).



Gambar 5.1 Diagram difraksi sinar-X untuk tanah yang digunakan.

Potensi kembang (*expansiveness potential*) tanah dapat diklasifikasikan dengan nilai aktivitas (*activity*) yang merupakan nilai banding antara indeks plastisitas dan kandungan lempung. Hubungan nilai *PI* dan kandungan lempung seperti disajikan pada Gambar 5.2. Van Der Werve (1964) membagi potensi kembang menjadi empat zona yaitu rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi. Tanah yang digunakan dalam penelitian ini memiliki potensi kembang sedang. Perhatikan grafik potensi kembang (Gambar 5.2) dan hasil analisis difraksi sinar-X (Gambar 5.1), mineral tanah yang diuji lebih dekat dengan *Ca-Montmorillonite*.



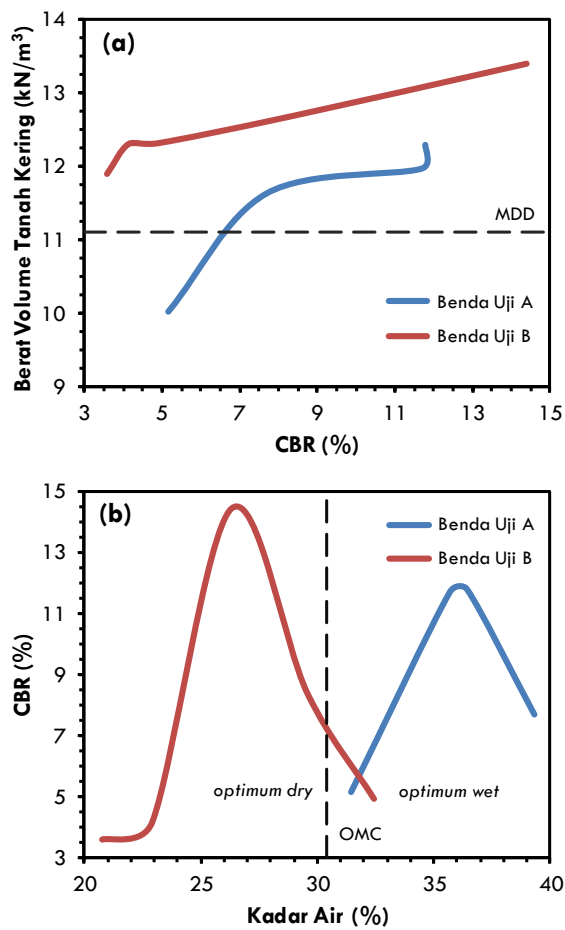
Gambar 5.2 Potensi kembang tanah

Nilai kuat tanah dasar yang ditunjukkan dengan nilai $CBR < 1\%$ pada kondisi terendam dan $CBR = 2,6\% - 3\%$ pada kondisi tidak terendam, mengindikasikan bahwa tanah memiliki kuat dukung yang rendah. Dalam standar perencanaan perkerasan jalan SNI 1732-1989-F (Standar Nasional Indonesia, 1989), tanah dasar jalan harus memenuhi nilai $CBR \geq 6\%$ setelah perendaman 4 hari. Sedangkan Austroads (2012), memberikan kriteria tanah dasar yang memiliki nilai $CBR < 3\%$ harus ditingkatkan dengan teknik perbaikan tanah atau diberi lapisan dasar di atasnya (*capping*) dengan tanah yang memiliki nilai $CBR > 3\%$.

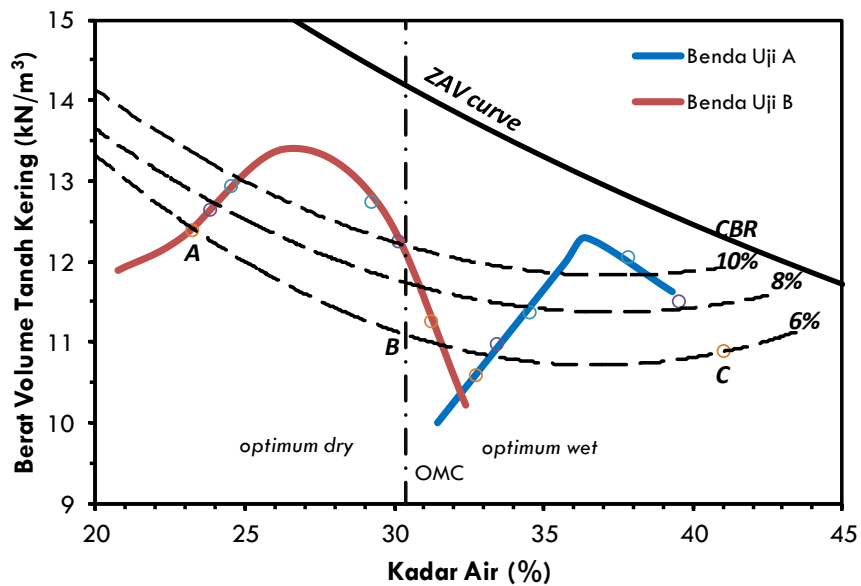
5.1.2 CBR Laboratorium

Pada penelitian ini, nilai CBR yang diperoleh merupakan nilai dari suatu sistem komposit antara kolom Eco-SiCC dan tanah (*composites system*). Hubungan antara nilai CBR dan berat volume tanah kering, serta CBR dan kadar air masing-masing ditampilkan seperti pada Gambar 5.3a dan 5.3b. Pada penelitian yang dilakukan terdapat dua kelompok benda uji komposit kolom – tanah yaitu benda uji A yang dipadatkan zona basah optimum (*optimum wet*) dan benda uji B pada zona kering optimum (*optimum dry*). Tanah komposit kolom memiliki rentang nilai CBR antara 3,5% hingga 14,5%. Pada Gambar 5.3a, nilai CBR tanah yang didukung dengan kolom meningkat seiring bertambahnya kepadatan tanah. Benda uji A memiliki kepadatan yang lebih rendah daripada benda uji B, sehingga menghasilkan nilai CBR yang lebih rendah pula dibandingkan dengan benda uji B. Hubungan antara CBR dan kadar air memiliki karakteristik seperti kurva pemadatan, dimana nilai CBR maksimum dicapai pada suatu nilai kadar air tertentu seperti pada Gambar 5.3b dan 5.4. Pada tanah komposit kolom yang dipadatkan pada kadar air basah optimum menghasilkan nilai CBR yang lebih rendah daripada tanah komposit kolom yang dipadatkan pada zona kering optimum. Namun kedua kelompok benda uji tersebut dapat menghasilkan nilai CBR yang sama walaupun memiliki kadar air yang berbeda. Sehingga, hubungan ketiga parameter CBR, kadar air dan berat volume tanah kering (atau kepadatan) seperti ditampilkan pada Gambar 5.4.

Garis putus-putus pada Gambar 5.4 merupakan garis kontur CBR yang merupakan pendekatan dari nilai-nilai CBR yang sama untuk setiap berat volume tanah kering dan kadar air. Garis CBR terendah adalah 6% sesuai dengan persyaratan lapisan subgrade perkerasan jalan menurut SNI 1732-1989-F (Standar Nasional Indonesia, 1989). Pada hubungan tersebut dapat dilihat bahwa nilai CBR cenderung meningkat dengan bertambahnya nilai berat volume tanah kering dan berkurangnya kadar air tanah. Grafik pada Gambar 5.4 dapat digunakan untuk merencanakan pekerjaan pemadatan tanah yang didukung dengan kolom-kolom, misalnya untuk memperoleh nilai CBR = 6%, maka tanah dasar atau *subgrade* dapat dipadatkan pada kondisi kadar air di titik A, B, atau C.



Gambar 5.3 (a) Hubungan antara CBR dan berat volume tanah kering, (b) Hubungan kadar air tanah dan CBR yang diberi kolom Eco-SiCC



Gambar 5. 4 Hubungan antara CBR, berat volume kering, dan kadar air untuk tanah yang diberi kolom Eco-SiCC

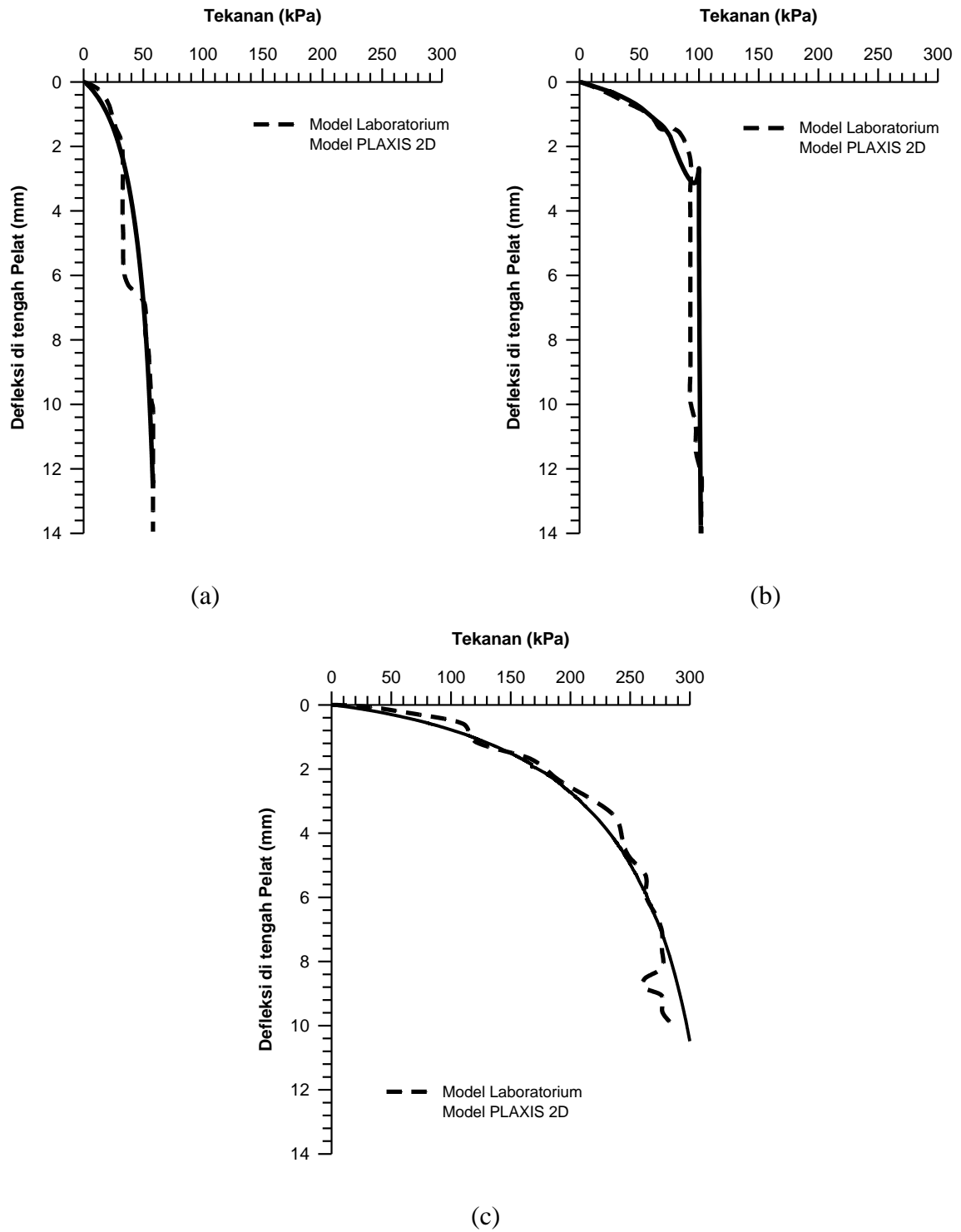
5.1.3 Perilaku Sistem Fondasi Dengan Kolom-Kolom

Perilaku sistem fondasi model pelat baja yang didukung kolom-kolom

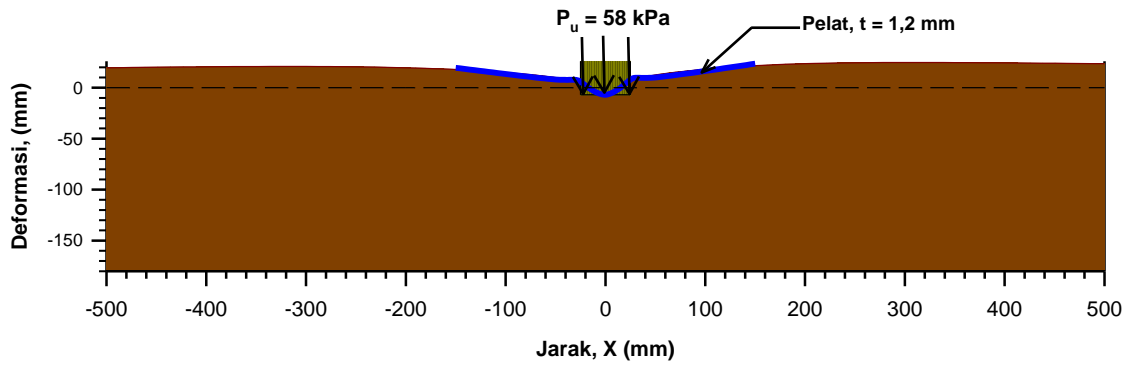
Perilaku sistem fondasi pelat fleksibel yang didukung oleh kolom-kolom terhadap beban yang bekerja di atasnya seperti disajikan pada Gambar 5.5. Secara umum, defleksi pelat bertambah besar dengan bertambahnya tekanan atau beban yang bekerja di atas pelat. Hasil simulasi numerik dengan PLAXIS terlihat jelas dalam Gambar 5.5 memberikan hasil yang lebih dekat dengan hasil pengamatan laboratorium. Perbedaan hasil analisis numerik dengan pengamatan laboratorium dapat dinyatakan dalam *normalized root mean square deviation (NRMSD)*. Untuk setiap nilai defleksi yang ditinjau, nilai *NRMSD* analisis numerik dan pengamatan laboratorium adalah 12,8% untuk model tanpa kolom; 9,9% untuk model pelat dengan dua kolom, dan 16,9% untuk model pelat dengan tiga kolom. Dari kurva hubungan tekanan dan defleksi, untuk pelat yang tidak didukung oleh kolom (Gambar 4a), tekanan maksimum yang dapat diterima oleh sistem fondasi adalah sebesar 58 kPa. Pemasangan dua kolom dibawah pelat meningkatkan kuat dukung menjadi 102 kPa (Gambar 5.5b). Kuat dukung sistem fondasi meningkat hingga mencapai 276 kPa dengan pemasangan tiga kolom (Gambar 5.5c). Hasil ini menunjukkan bahwa pemasangan kolom-kolom dapat meningkatkan kuat dukung dari sistem fondasi.

Gambar 5.6 memberikan ilustrasi perilaku defleksi pelat baik tanpa kolom dan yang didukung oleh kolom-kolom akibat beban maksimum yang bekerja di atasnya (P_u). Sebelum pembebanan, pelat mengalami defleksi ke atas akibat tekanan pengembangan selama enam hari penjenuhan. Untuk pelat tanpa kolom terjadi defleksi di tengah pelat sebesar 7 mm akibat pengembangan (Gambar 5.7a). Tekanan ke atas yang dapat ditahan adalah 22 kPa. Pemasangan kolom-kolom mampu mengurangi defleksi di tengah pelat menjadi 0,63 mm dan 1,2 mm masing-masing untuk dua dan tiga kolom (Gambar 5b dan 5c). Tekanan ke atas yang dapat ditahan masing-masing sebesar 59 kPa dan 63 kPa untuk dua dan tiga kolom.

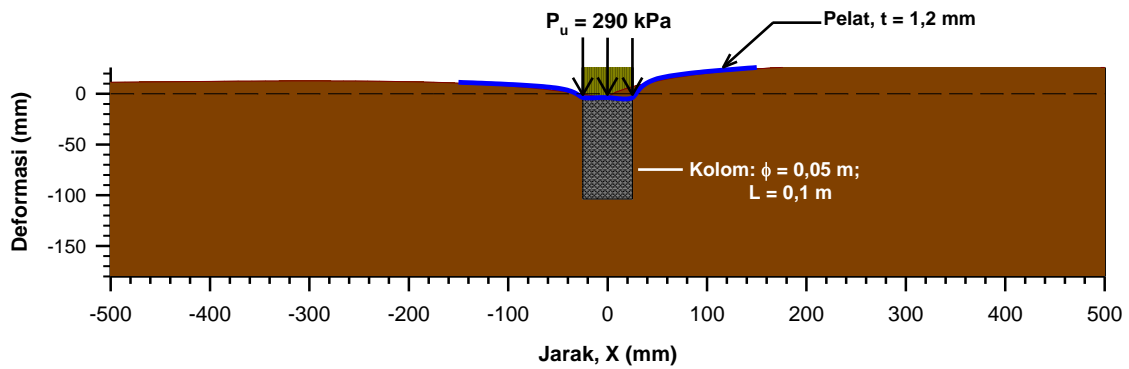
Hasil analisis balik dengan PLAXIS menunjukkan bahwa defleksi pelat hasil analisis numerik dan pengamatan laboratorium memiliki pola yang sama. Nilai *NRMSD* defleksi pelat untuk masing-masing model adalah 18%, 51%, dan 20% masing-masing untuk model tanpa kolom, dengan dua kolom, dan tiga kolom.



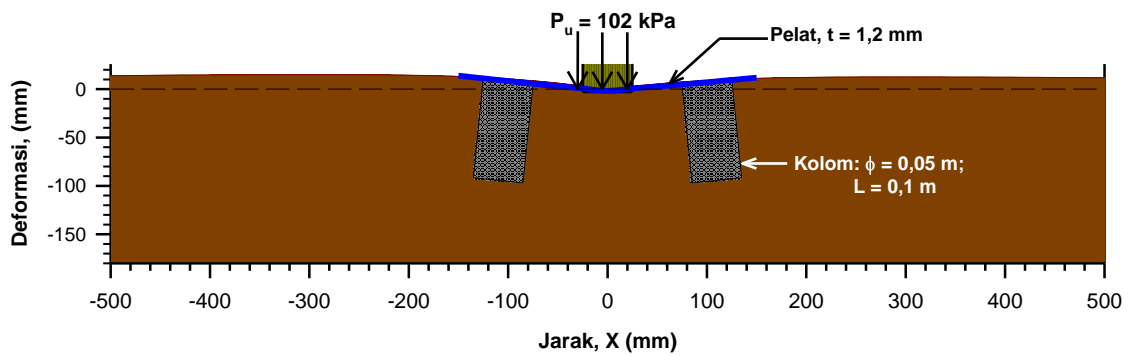
Gambar 5. 5 Hubungan tekanan dan deformasi di tengah pelat hasil uji model laboratorium dan model numerik (a) tanpa kolom, (b) dengan 2 kolom, (c) dengan 3 kolom.



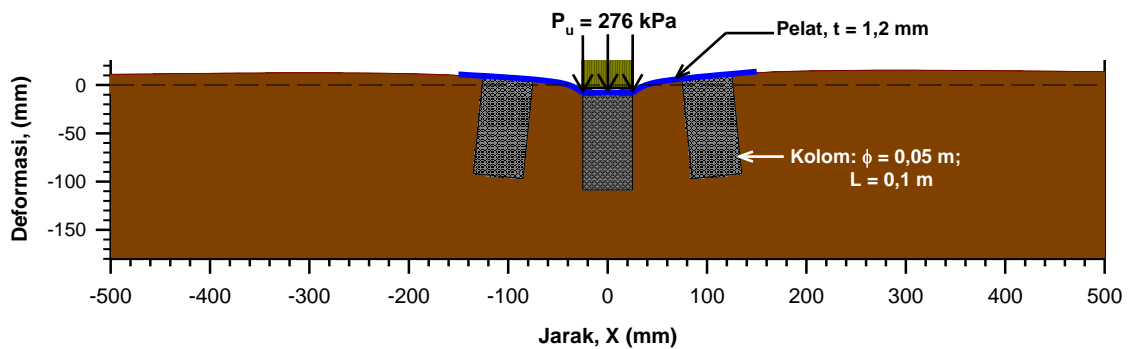
(a)



(b)

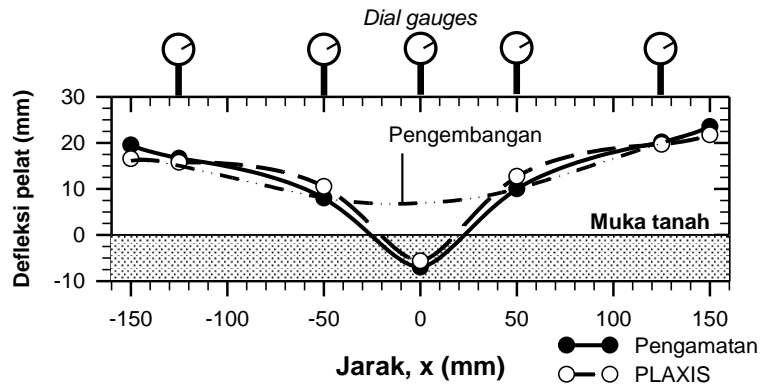


(c)

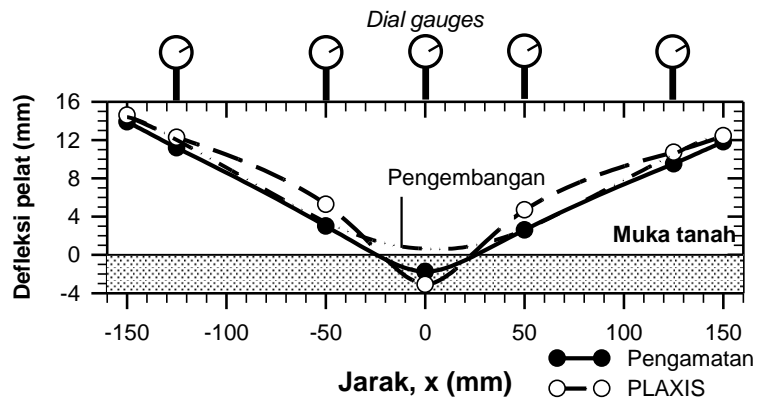


(d)

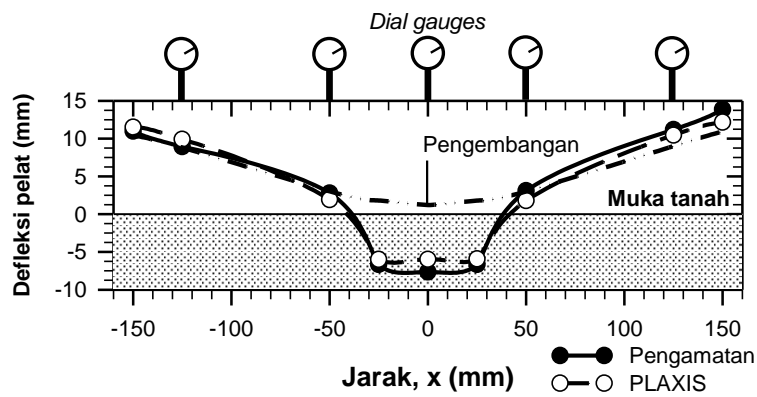
Gambar 5. 6 Deformasi tanah dan sistem fondasi pelat fleksibel dengan kolom-kolom hasil pengamatan laboratorium (a) tanpa kolom, (b) dengan 1 kolom, (c) dengan 2 kolom, dan (d) dengan 3 kolom.



(a)



(b)



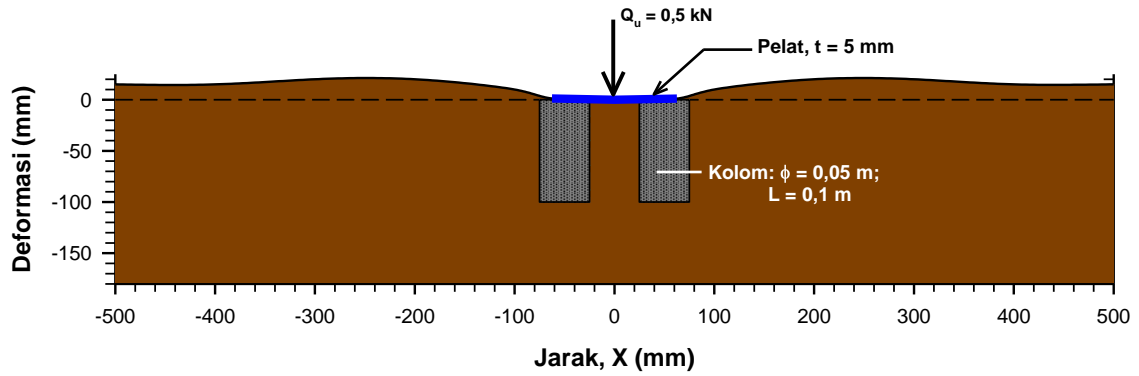
(c)

Gambar 5.7 Defleksi pelat akibat beban maksimum yang bekerja (a) tanpa kolom, $P_u = 58$ kPa, (b) dua kolom, $P_u = 102$ kPa, (c) tiga kolom, $P_u = 276$ kPa.

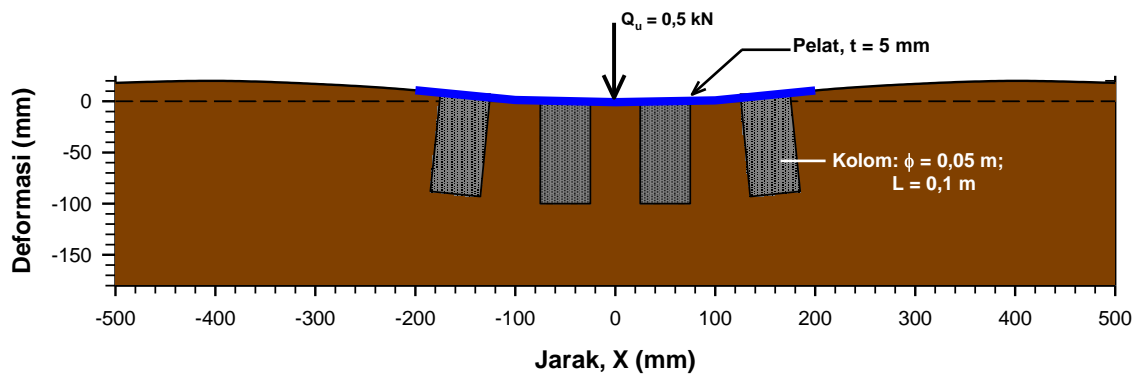
Perilaku sistem fondasi model pelat acrylic flexiglass yang didukung kolom-kolom

Perilaku deformasi pelat model *acrylic flexiglass* yang didukung kolom-kolom dan permukaan tanah digambarkan pada Gambar 5.9. Akibat rendaman air selama 3 hari, terjadi pengembangan vertikal permukaan tanah. Pengembangan terbesar terjadi pada bagian tanah yang tidak didukung oleh kolom-kolom. Gaya vertikal ke atas atau

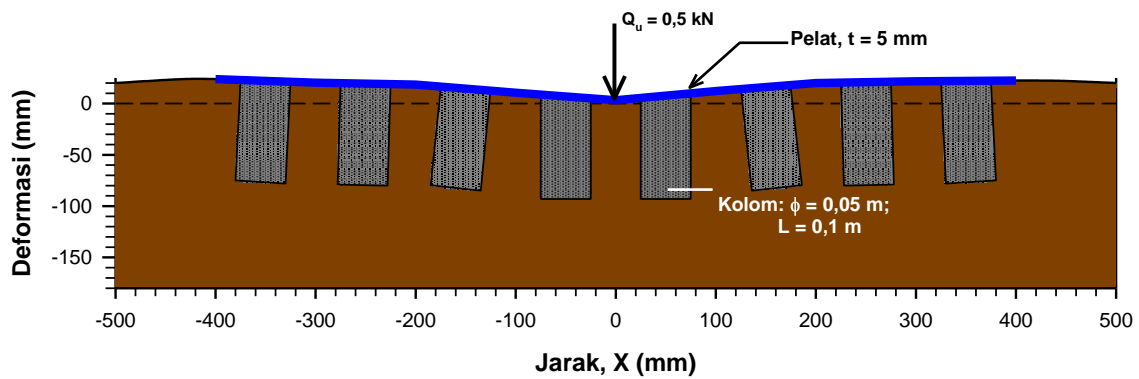
gaya angkat masing-masing adalah 0,47 kN; 0,37 kN; dan 0,17 kN untuk model yang didukung oleh 4 kolom, 8 kolom, dan 16 kolom. Karakteristik beban dan defleksi di tengah pelat model *acrylic flexiglass* yang didukung kolom-kolom seperti ditampilkan pada Gambar 5.8.



(a)

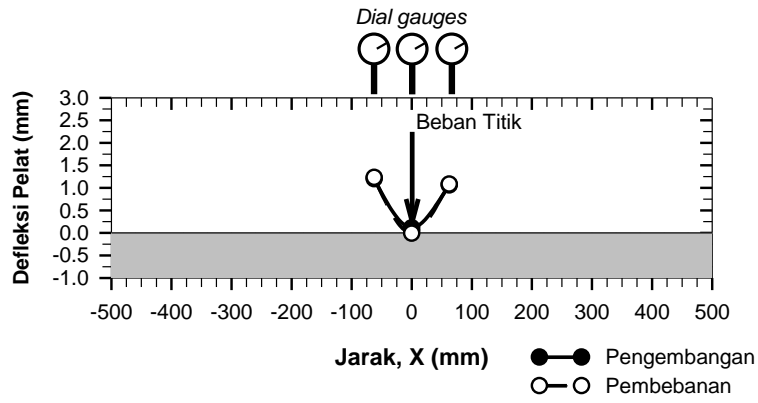


(b)

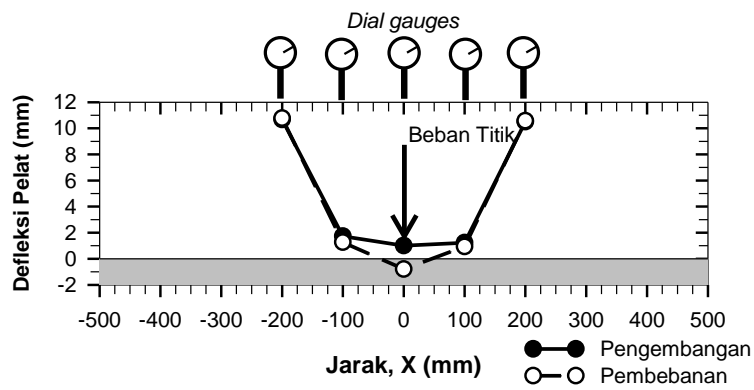


(c)

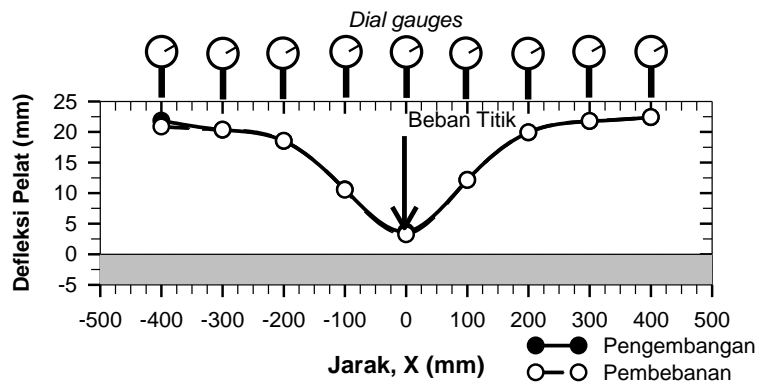
Gambar 5. 8 Perilaku deformasi permukaan tanah dan pelat *acrylic flexiglass* yang didukung kolom-kolom dengan beban $Q_u = 0,5$ kN.



(a)

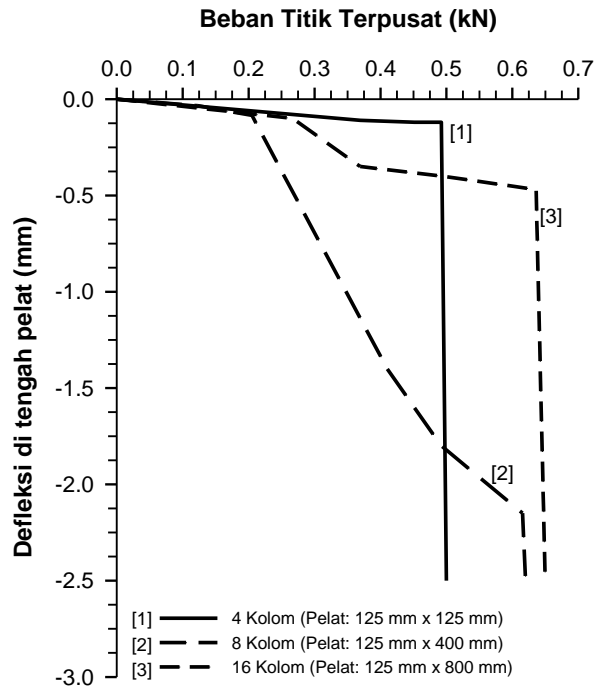


(b)



(c)

Gambar 5.9 Defleksi pelat akibat beban 0,5 kN (a) pelat ukuran 125 mm x 125 mm, (b) pelat ukuran 125 mm x 400 mm, (c) pelat ukuran 125 mm x 800 mm.



Gambar 5. 10 Hubungan tekanan dan deformasi di tengah pelat acrylic flexiglass yang didukung kolom-kolom hasil uji model laboratorium.

5.2 PEMBAHASAN

Peningkatan kuat dukung pada sistem fondasi pelat yang didukung kolom-kolom dapat dijelaskan dengan prinsip *beam on elastic foundation* (BOEF) oleh Hetenyi (1964). Pada saat pelat dibebani dengan beban terpusat, maka pelat akan terdefleksi yang diikuti dengan berotasinya kolom-kolom di sekitar beban. Kolom-kolom di dekat beban mengalami rotasi terbesar. Rotasi ini akan memobilisasi tekanan tanah di sekitar kolom. Gaya-gaya perlawanan tanah di sekitar kolom mereduksi defleksi pelat. Besarnya gaya-gaya perlawanan ini bergantung pada kondisi tanah (kepadatan, kuat geser) dan dimensi (panjang dan besar) serta jarak antar kolom. Pada penelitian ini terbukti bahwa jarak antar kolom memberikan pengaruh terhadap kuat dukung dan defleksi pelat. Dalam teori BOEF, besar dan distribusi modulus reaksi tanah dasar (k_s) memberikan pengaruh terhadap perilaku. Namun dalam pendekatan teori kontinum (*continuum approach*), nilai modulus elastisitas (E) dan angka poisson (ν) merupakan dua parameter penting yang mempengaruhi gaya-gaya perlawanan pada fondasi fondasi (Biot, 1937).

Hasil analisis balik dengan PLAXIS menunjukkan bahwa pemodelan dengan *Hardening-soil* (HS) mampu memodelkan perilaku pelat dan kolom-kolom dalam

menerima beban. Penyimpangan yang besar antara defleksi hasil analisis PLAXIS dan pengamatan laboratorium dapat disebabkan oleh pengaruh interaksi pelat dan tanah serta kolom dan tanah. Dalam pemodelan PLAXIS, gaya-gaya dan defomasi pada elemen struktur seperti *plate* dipengaruhi oleh pengaturan pada nilai interaksi tanah – tiang (R_{inter}). Untuk menghasilkan perilaku yang lebih realistis pada model 2D, beberapa peneliti (Sluis, 2012; Tschuchnigg dan Schweiger, 2013; Dao, 2011; Phung, 2010; Ryltenius, 2011) menyebutkan nilai R_{inter} harus diatur sedemikian rupa sebagai elemen pegas non-linier (*non-linear spring*). Akan tetapi, dalam naskah ini tidak dikaji pengaruh nilai R_{inter} terhadap model yang dikaji.

5.3 LUARAN PENELITIAN YANG TELAH DICAPAI

Dari hasil penelitian yang telah diperoleh, luaran penelitian yang telah dicapai adalah :

- (1) Naskah yang disajikan pada Konferensi Nasional Teknik Sipil ke-8 dengan judul naskah PERILAKU BEBAN – DEFORMASI PELAT FLEKSIBEL DIDUKUNG DENGAN KOLOM-KOLOM ECO-SiCC DI TANAH EKSPANSIF yang diselenggarakan di Bandung pada tanggal 16–17 Oktober 2014, (Lampiran A).
- (2) Naskah yang disajikan pada Southeast Asian Confernce on Soft Soils and Ground Improvement (Soft Soils 2014) dengan judul naskah IMPROVEMENT OF EXPANSIVE SUBGRADE USING COLUMN TECHNIQUE OF CARBIDE LIME AND RICE HUSK ASH MIXTURES yang diselenggarakan di Bandung pada tanggal 21–23 Oktober 2014 (Lampiran B).
- (3) Undangan sebagai Visiting Professor di Kasesart University, Bangkok, Thailand untuk periode 15 Agustus – 3 September 2014 (Lampiran C).

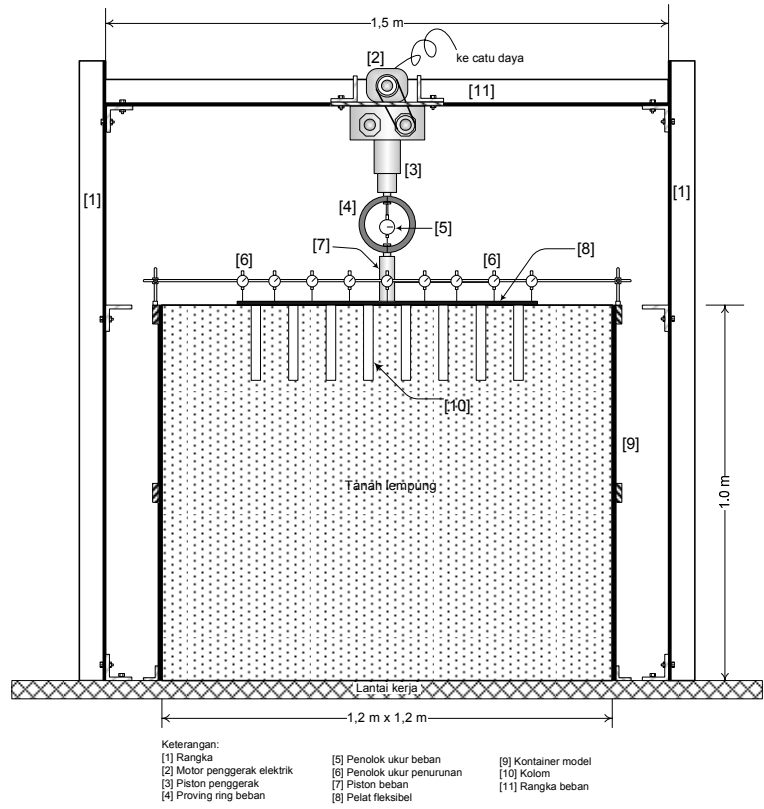
BAB 6. RENCANA TAHAPAN BERIKUTNYA

Pada tahun kedua akan dilakukan pengujian laboratorium terhadap model kolom yang dimaksudkan untuk mengkaji pengaruh ukuran dan susunan kolom terhadap beban dan penurunan, dan modulus reaksi tanah. Bahan kolom terbuat dari campuran limbah karbit dan abu sekam padi. Pada penelitian ini kolom-kolom ini mendukung perkerasan jalan yang dimodelkan dengan pelat lentur (*flexible plate*). Kolom dan pelat diuji di atas tanah ekspansif yang diletakkan dalam kotak uji seperti Gambar 6.1. Pengujian ini dilakukan untuk modulus reaksi tanah dasar dan kolom berdasarkan hubungan beban defleksi. Pengujian dilaksanakan setelah kolom berumur 7 hari. Pada pengujian model pelat fleksibel yang didukung kolom-kolom, kekuatannya akan bergantung pada kekuatan pelatnya sendiri, kuat dukung tanah dasar dan interaksi antara pelat dan tanah dasar, serta kekuatan kolom. Untuk mengevaluasi sistem ini maka diperlukan pengujian model struktur perkerasan lentur itu sendiri. Pengujian terhadap model struktur perkerasan lentur dilakukan untuk menentukan kuat dukung struktur perkerasan lentur yang didukung oleh kolom-kolom. Variasi susunan kolom dan pelat seperti ditunjukkan pada Gambar 6.2. Uji beban pelat dilakukan guna mengetahui hubungan beban dan lendutan yang nantinya dinyatakan dalam modulus reaksi tanah dasar (k).

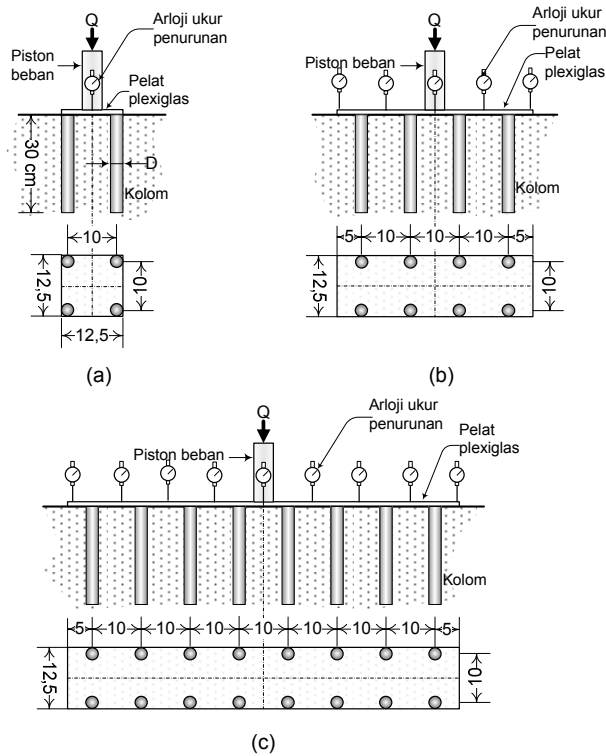
Modulus reaksi tanah dan kolom untuk setiap susunan kolom dan tebal pelat dihitung dengan persamaan (1) berikut :

$$k = \frac{q}{\delta_a} \quad (6.1)$$

dengan q = tekanan pada pelat = Q/A , Q = beban titik, A = luas pelat, δ_a = defleksi rata-rata pelat = $\delta_a = \left[l_i (\delta_i + \delta_{i+1}) + l_{i+1} (\delta_{i+1} + \delta_{i+2}) + \dots + l_{n-1} (\delta_{n-1} + \delta_n) \right] / 2L$, L = panjang total pelat, δ_i = defleksi di titik ke- i dari pelat fleksibel, l_i = jarak antar titik, n = jumlah titik pengukuran defleksi (Hardiyatmo, 2009).



Gambar 6. 1 Skema alat uji beban langsung di laboratorium.



Gambar 6. 2 Rencana susunan kolom dan pelat untuk pengujian beban – deformasi laboratorium (a) susunan 4 kolom, (b) susunan 8 kolom, dan (c) susunan 16 kolom

BAB 7. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang dilakukan, dapat dirumuskan kesimpulan sebagai berikut :

1. Tanah komposit kolom memiliki rentang nilai CBR antara 3,5% hingga 14,5%. Nilai CBR tanah yang didukung dengan kolom meningkat seiring bertambahnya kepadatan tanah
2. Pemasangan kolom-kolom mampu mengurangi defleksi di tengah pelat dari 7 mm menjadi 0,63 mm dan 1,2 mm masing-masing untuk dua dan tiga kolom akibat tekanan pengembangan.
3. Pemasangan kolom-kolom dapat meningkatkan kuat dukung dari sistem fondasi. Tekanan atau beban maksimum yang dapat diterima oleh sistem fondasi tanpa didukung kolom adalah sebesar 58 kPa. Pemasangan dua dan tiga kolom dibawah pelat meningkatkan kuat dukung menjadi 102 kPa dan 276 kPa.
4. Hasil analisis balik dengan PLAXIS menunjukkan bahwa pemodelan dengan *Hardening-soil (HS)* mampu memodelkan perilaku pelat dan kolom-kolom dalam menerima beban. Defleksi pelat hasil analisis numerik dan pengamatan laboratorium memiliki pola yang sama. Nilai *NRMSD* defleksi pelat untuk masing-masing model adalah 18%, 51%, dan 20% masing-masing untuk model tanpa kolom, dengan dua kolom, dan tiga kolom.

BAB 8. DAFTAR PUSTAKA

- ASTM Standard ASTM D1883 - 07e2, 2011. Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard D2487, 2011, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Austroroads (2012), Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design, Sydney, Australia
- Adam, A., Ibrahim, I., Alhardllo, A., Hadi, A., Ibrahim, M., 2012, *Effect of hydrated lime on behavior of expansive soil as subgrade of flexible pavement structural system*, Proceeding The 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials: Design, Performance, and Application, Wuhan, China, 18-22 October 2012, pp. 64-76
- Baker, S., 2000, *Deformation behavior of lime/cement stabilized clay*. Thesis for Ph.D, Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Göterberg, Sweden.
- Basha, E.A., Hashim, R., Mahmud, H.B., Muntohar, A.S., 2005, Stabilization of residual soils with ice husk ash and cement. *Construction and Building Material*, Vol. 19: 448-453.
- Budi, G.S., 2003, Penyebaran kekuatan dari kolom yang terbuat dari limbah karbit dan kapur. *Jurnal Dimensi Teknik Sipil*, Vol. 5 No. 2: 99-102.
- Daud, S., Junica, M.I., Sunaryo, M.E., Pertiwi, D., 2009, Kajian dan monitoring hasil uji coba skala penuh teknologi Cakar Ayam Modifikasi, Kolokium Hasil Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan Tahun 2009, Badan Penelitian dan Pengembangan Jalan, Kementerian Pekerjaan Umum, pp. 244-284.
- Jaturapitakkul, C., Roongreung, B., 2003, Cementing Material from Calcium Carbide Residue-Rice Husk Ash, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 1(5), 470-475.
- Hardiyatmo, H.C., 2009, Metode hitungan lendutan pelat dengan menggunakan modulus reaksi tanah dasar ekuivalen untuk struktur pelat fleksibel. *Jurnal Dinamika Teknik Sipil*, Vol. 9(2), pp. 149-154.
- Horpibulsuk, S., Phetchuay, C., Chinkulkijniwat, A., 2012, Soil Stabilization by Calcium Carbide Residue and Fly Ash, *Journal of Material in Civil Engineering*, Vol. 24(2): 184-193.
- Kamon, M., Nontananandh, S., 1991. Combining industrial wastes with lime for soil stabilization. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117 No. 1: 1-17.
- Kempfert, H.G., 2003, *Ground improvement methods with special emphasis on column-type techniques*, In Vermeer, Schwiger, and Cudny (Eds.), Proceeding of International Workshop on Geotechnics of Soft Soil: Theory and Practice, Netherlands, Verlag Glückauf, 101-112.

- Krammart, P., Tangtermsirikul, S., 2003, A Study on Cement Made by Partially Replacing Cement Raw Materials with Municipal Solid Waste Ash and Calcium Carbide Waste, *Science Asia*, Vol. 29, 77-84.
- Krammart, P., Tangtermsirikul, S., 2004, Properties of cement made by partially replacing cement raw materials with municipal solid waste ashes and calcium carbide waste, *Construction and Building Materials*, Vol. 18: 579–583.
- Muntohar, A.S., 1999, Abu sekam padi untuk stabilisasi tanah lempung. *Jurnal Wahana Teknik*, Vol. 1 No. 2, 1-10
- Muntohar, A.S., 2002, Utilization of uncontrolled-burnt of rice husk ash in soil improvement. *Jurnal Dimensi Teknik Sipil*, Vol. 4 No. 2, 100-105.
- Muntohar, A.S., 2003, *Lime-column in expansive soil: A study on the compressive strength*, Makalah Disajikan, International Conference on Civil Engineering, 1-3 October 2003, Malang, East Java (CD-ROM)
- Muntohar, A.S., 2005a, The influence of molding water content and lime content on the strength of stabilized soil with lime and rice husk ash. *Jurnal Dimensi Teknik Sipil*, Vol. 7(1), 1-5.
- Muntohar, A.S., 2005b, Geotechnical properties of rice husk ash enhanced lime-stabilized expansive clay. *Jurnal Media Komunikasi Teknik Sipil*, Vol. 13 No. 3, 1-11.
- Muntohar, A.S., 2006, The swelling of expansive subgrade at Wates - Purworejo roadway STA. 8+127, *Civil Engineering Dimension*, Vol. 8(2), pp. 106 – 110.
- Muntohar, A.S., Abidin, Z., 2001. A comparative study of different additive on the index properties of expansive soils. *Jurnal Semesta Teknika*, Vol. 4 No. 2: 59-67
- Muntohar, A.S., Hantoro, G., 2000, Influence of the rice husk ash and lime on engineering properties of clayey sub-grade. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 5 – 2000 (www.ejge.com).
- Muntohar, A.S., dan Hashim, R., 2002, *Silica waste utilization in ground improvement: A study of expansive soil treated with LRHA*. Proceeding 4th International Conference on Environmental Geotechnics, 12-14 August 2002, Rio de Janeiro, Brazil, 515-519.
- Muntohar, A.S., Liao, H.J., 2006, *Strength distribution of the soil surrounding lime-column*, In Chan, D., and Law, K.T. (Eds.) : Proceeding 4th International Conference on Soft Soil Engineering, 2-6 October 2006, Vancouver, Canada, 315-319.
- Muntohar, A.S., Widiyanti, A., Oktovian, E., Hartono, E., Diana, W., 2008a, *Aplikasi teknik kolom-semen (cement-column) pada tanah berpasir.*, Naskah disajikan pada Seminar Nasional Sains dan Teknologi ke-2 (SATEK2), Universitas Lampung, 17 – 18 November 2008. (CD-ROM)
- Muntohar, A.S., Muhammad, A., Damanhuri, Dinor, S., 2008b, *Karakteristik kuat dukung tanah berpasir di sekitar kolom-kapur (lime-column)*. Naskah disajikan pada Seminar Nasional Sains dan Teknologi ke-2 (SATEK2), Universitas Lampung, 17 – 18 November 2008. (CD-ROM)
- Muntohar, A.S., 2009, *Mekanika Tanah*, Penerbit LP3M UMY.
- Porbaha, A., Zen, K., Kobayashi, M., 1999, Deep mixing technology for liquefaction mitigation, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 5 No. 1, 21-34.
- Prabowo, D.R., 2010, *Analisis ekonomi perkerasan lentur dan perkerasan menggunakan pile slab pada ruas jalan Babat-Bojonegoro*, Tugas Akhir RC09 1380, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Rogers, C.D.F., Glendinning, S., 1997, Improvement of clay soils in situ using lime piles in UK, *Engineering Geology*, Vol. 47, 243-257.

- Rogers, C.D.F., Glendinning, S., 2002, *Lime requirement for stabilization*, Transportation Research Record No. 1721, Paper No. 00-0604, National Research Council, pp. 9-18.
- Sahoo, J.P., Pradhan, P.K., 2010, Effect of lime stabilized soil cushion on strength behaviour of expansive soil, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 28, pp. 889–897
- Setyawan, R.N., dan Widiyanti, A., 2004. Pengaruh penambahan limbah karbit terhadap nilai parameter kuat geser tanah lempung. *Jurnal Semesta Teknik*, Vol. 7 No. 1: 30-38.
- Shen, S.L., Miura, N., dan Koga, H., 2003. Interaction mechanism between deep mixing column surrounding clay during installation. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40: 293-307.
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., 2011, Carbide Residue–Ground Fly Ash Paste. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 23(3): 298–304.
- Tutumluer E, Thompson M., 2005. Progress Report on Laboratory Soil Test Results. Technical Note No. 19, Center of Excellence for Airport Technology, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Tonoz, M.C., Gokceoglu, C., dan Ulusay, R., 2003, A laboratory-scale experimental investigation on the performance of lime in expansive Ankara (Turkey) clay, *Bulletin Engineering Geology & Environmental*, Vol. 62, 91-106.
- Widajat, D., Suherman, 2008, *Evaluasi penanganan kerusakan perkerasan jalan diatas tanah ekspansif*, Kolokium Hasil Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan Tahun 2009, Badan Penelitian dan Pengembangan Jalan, Kementerian Pekerjaan Umum. (CD-ROM)
- Widiyanti, A., Hartono, E., Muntohar, A.S., 2007, Kekuatan geser campuran tanah – kapur – abu sekam padi dengan inklusi kadar serat karung plastik yang bervariasi, *Jurnal Semesta Teknik*, Vol. 10(1), pp. 1-13.
- Widiyanti, A., Hartono, E., dan Muntohar, A.S., 2008. Studi model embankment tanah dengan campuran kapur-abu sekam padi dan serat karung plastik. *Jurnal Dinamika Teknik Sipil*, Vol. 8(2), pp. 118-126.
- Younger, J.S., 1991, *Geotechnical characteristics of soft soils in Indonesia*; In Balasubramaniam et al (eds.), *Development in Geotechnical Aspects of Embankment, Excavations and Buried Structures*, Rotterdam, Balkema: 557 – 570.
- Zhang, M.H., Lastra, R., and Malhotra, V.M., 1996, Rice husk ash paste and concrete: Some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste, *Cement and Concrete Research*, Vol. 26 (6), 963 – 977.
- Zhou, C., Yin, J.H., Ming, J.P., 2002, Bearing capacity and settlement of weak fly ash ground improved using lime-fly ash or stone columns, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 39, 585 – 596.
- Standar Nasional Indonesia SNI 1732-1989-F, 1989, *Tata Cara Perencanaan Tebal Perkerasan Jalan Raya Dengan Metode Analisa Komponen*, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta
- Van der Merwe, D.H., 1964. The prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fraction of soil, *Civil Engineering Society of Africa*, Vol. 6(6): 103-107

Lampiran A

NASKAH SEMINAR
NASIONAL
Konferensi Nasional
Teknik Sipil ke-8,
Bandung 16-17
Oktober 2014.

Penelitian Unggulan
Perguruan Tinggi
(Tahun ke-1)

ABSTRAK KoNTekS 8

Peran Rekayasa Sipil dalam Pembangunan Infrastruktur Perkotaan Berkelanjutan untuk Mendukung Percepatan dan Perluasan Pembangunan Ekonomi Indonesia

Bandung, 16-17 Oktober 2014

No . Abstrak	089
Judul	PERILAKU BEBAN – DEFORMASI PELAT FLEKSIBEL DIDUKUNG DENGAN KOLOM-KOLOM ECO-SiCC DI TANAH EKSPANSIF
Penulis	Agus Setyo Muntohar, Sri Atmaja P. Rosyidi, Willis Diana, Iswanto
Instansi	Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Email:	muntohar@umy.ac.id
Abstrak	<p>Naskah ini menyajikan hasil pengujian beban-deformasi pelat fleksibel yang didukung oleh kolom-kolom Eco-SiCC di laboratrouim. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk perilaku pelat fleksibel yang didukung kolom-kolom pada tanah ekspansif di laboratorium. Hasil pengamatan defleksi pelat dan beban dibandingkan dengan model metode elemen hingga. Kolom dan pelat diuji di atas tanah ekspansif yang diletakkan dalam kotak uji berukuran 1 m x 0,2 m x 0,2 m. Kolom yang digunakan berukuran panjang 0,1 m dan diameter 0,05 m. Terdapat 2 konfigurasi kolom yang diuji untuk mendukung pelat yaitu 2 kolom (K1) dan 3 kolom (K2). Pelat yang digunakan berupa pelat baja berukuran 0,3 m x 0,2 m dengan tebal 1,2 mm. Pengujian beban (loading test) dilakukan setelah kolom berumur 7 hari. Untuk model elemen hingga, tanah dimodelkan dengan model undrained Hardening Soil (HS) dan pelat serta kolom dengan model linear-elastic. Hasil pengujian di laboratorium menunjukkan bahwa pelat fleksibel di tanah ekspansif yang didukung oleh 2 dan 3 kolom Eco-SiCC mampu menerima beban ultimit masing-masing sebesar 2 kali dan 5 kali dari beban ultimit tanpa kolom. Deformasi pelat fleksibel yang didukung kolom Eco-SiCC berkurang hingga 3 kali dari deformasi tanpa kolom. Simulasi numerik menunjukkan bahwa ketika menerima beban yang bekerja, kolom mengalami deformasi arah lateral sehingga mampu mengurangi deformasi pelat fleksibel.</p>
Kata kunci	pelat fleksibel, kolom Eco-SiCC, defleksi, tanah ekspansif

LEMBAR REVIEW

No. Abstrak	089
Komentar/usulan terhadap judul	Ok.
Komentar/usulan terhadap abstrak	Jelas. Ok.
Hasil evaluasi (<i>diterima/ diterima dan diperbaiki/ ditolak</i>)	Diterima
Bila ditolak, mohon menuliskan alasan penolakan	

PERILAKU BEBAN – DEFORMASI PELAT FLEKSIBEL DIDUKUNG DENGAN KOLOM-KOLOM ECO-SiCC DI TANAH EKSPANSIF

Agus Setyo Muntohar¹, Sri Atmaja P. Rosyidi¹, Willis Diana¹, Iswanto²

¹ Jurusan Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Email: muntohar@umy.ac.id

² Jurusan Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Kampus UMY Jl. Lingkar Selatan Taman Tirta, Yogyakarta, Indonesia. 55183

ABSTRAK

Naskah ini menyajikan hasil pengujian beban-deformasi pelat fleksibel yang didukung oleh kolom-kolom Eco-SiCC di laboratorium. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk perilaku pelat fleksibel yang didukung kolom-kolom pada tanah ekspansif di laboratorium. Hasil pengamatan defleksi pelat dan beban dibandingkan dengan model metode elemen hingga. Kolom dan pelat diuji di atas tanah ekspansif yang diletakkan dalam kotak uji berukuran 1 m x 0,2 m x 0,2 m. Kolom yang digunakan berukuran panjang 0,1 m dan diameter 0,05 m. Terdapat 2 konfigurasi kolom yang diuji untuk mendukung pelat yaitu 2 kolom (K1) dan 3 kolom (K2). Pelat yang digunakan berupa pelat baja berukuran 0,3 m x 0,2 m dengan tebal 1,2 mm. Pengujian beban (loading test) dilakukan setelah kolom berumur 7 hari. Untuk model elemen hingga, tanah dimodelkan dengan model undrained Hardening Soil (HS) dan pelat serta kolom dengan model linear-elastic. Hasil pengujian di laboratorium menunjukkan bahwa pelat fleksibel di tanah ekspansif yang didukung oleh 2 dan 3 kolom Eco-SiCC mampu menerima beban ultimit masing-masing sebesar 2 kali dan 5 kali dari beban ultimit tanpa kolom. Deformasi pelat fleksibel yang didukung kolom Eco-SiCC berkurang hingga 3 kali dari deformasi tanpa kolom. Simulasi numerik menunjukkan bahwa ketika menerima beban yang bekerja, kolom mengalami deformasi arah lateral sehingga mampu mengurangi deformasi pelat fleksibel.

Kata kunci: pelat fleksibel, kolom Eco-SiCC, deformasi, tanah ekspansif.

1. PENDAHULUAN

Permasalahan yang sering dijumpai pada konstruksi yang dibangun di atas tanah lunak dan tanah ekspansif adalah penurunan tanah yang besar saat basah yang menyebabkan kuat dukung tanah yang sangat rendah, dan susut yang tinggi saat kering yang menyebabkan retakan pada tanah dasar dan bangunan. Teknik perbaikan tanah ekspansif secara kimiawi dengan menggunakan kapur telah banyak diterapkan. Umumnya kapur dicampurkan ke lapisan tanah dasar yang ekspansif, dipadatkan pada kadar air tertentu (Sahoo & Pradhan, 2010; Adam dkk., 2012). Teknik lain yang digunakan adalah dengan teknik kolom kapur (*lime-column*) seperti yang diterapkan oleh Muntohar (2003), Budi (2003), Muntohar & Liao (2006), dan Tonoz dkk. (2005). Akan tetapi teknik kolom kapur ini lebih diarahkan untuk perbaikan tanah dalam atau dikenal dengan *deep ground improvement* yang memiliki ukuran diameter mencapai 1 m dan kedalaman hingga 20 m (Broom, 1981; Rogers & Glendinning, 1997; Porbaha dkk., 1999). Selain itu, teknik kolom ini juga dapat digunakan sebagai fondasi untuk bangunan gedung (Kempfert, 2003). Walaupun demikian aplikasi teknik kolom ini masih diperlukan untuk dikaji untuk sistem fondasi.

Pemasangan kolom-kolom dari bahan-bahan semen atau pozzolan ke dalam tanah dasar yang menyerupai tiang-tiang diharapkan dapat meningkatkan kuat dukung dan mengurangi deformasi pada fondasi akibat tekanan pengembangan tanah ekspansif. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengkaji perilaku sistem fondasi dengan pelat fleksibel yang didukung oleh kolom-kolom pada tanah ekspansif di laboratorium. Pengamatan model laboratorium meliputi defleksi pelat dan beban ultimit

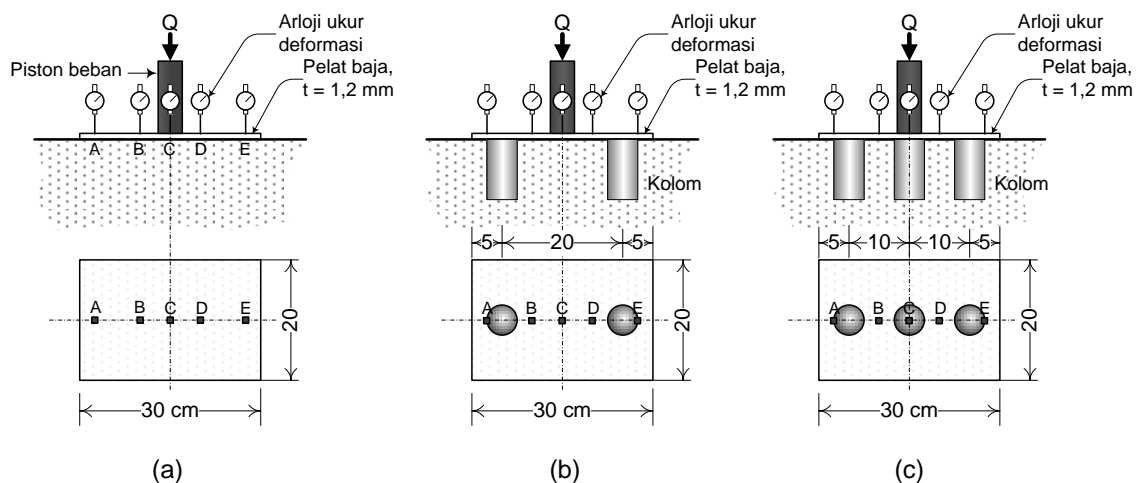
yang bekerja pada sistem fondasi. Hasil pengamatan laboratorium dibandingkan hasil model metode elemen hingga.

2. METODE PENELITIAN

Model Laboratorium

Uji beban pada pelat fleksibel dilakukan pada pelat baja tipis yang didukung oleh kolom-kolom diletakkan pada tanah dasar lempung ekspansif. Pengujian dilakukan di Laboratorium Geoteknik Jurusan Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Tanah dasar digunakan lempung yang berasal dari Bangunjiwo, Kasihan, Bantul, dengan berat jenis (G_s) = 2,56, berat volume tanah kering maksimum (MDD) = 12 kN/m³, kadar air optimum (OMC) = 37%, LL = 73%, PL = 40% dan PI = 33%. Tanah dipadatkan dalam kotak model pada dejabat kepadatan 95% MDD pada kondisi optimum kering. Kolom-kolom berpenampang lingkaran diameter 0,05 m dan panjang 0,1 m terbuat dari Eco-SiCC (Patent No. P00201304681).

Pengujian beban dilakukan setelah kolom berumur 7 hari. Uji beban pelat dilakukan pada pelat model fondasi berupa pelat baja dengan ketebalan 1,2 mm yang memiliki modulus elastisitas (E) sebesar $8,3 \times 10^6$ kPa. Dalam pengujian ini pelat dibuat berukuran 0,3 m x 0,2 m, sehingga pelat memiliki kekakuan (EI) sebesar $2,4 \times 10^{-4}$ kN.m². Beban diberikan secara terpusat di tengah-tengah pelat melalui piston elektrik yang ditahan oleh rangka baja. Pembebanan dilakukan secara bertahap hingga mencapai keruntuhan. Sebelum pengujian beban, tanah dalam kotak model digenangi air selama 6 hari untuk mengamati pengembangan dan tekanan pengembangan tanah. Pengembangan diamati dari sejumlah arloji ukur (*dial gauge*) yang dipasang seperti pada Gambar 1. Sedangkan, tekanan pengembangan diukur dari arloji ukur pada *proving ring* beban. Sejumlah arloji pengukur deformasi (*dial gauge*) diletakkan di 5 titik di atas pelat. Letak titik beban adalah di pusat pelat (titik C) dan dan arloji pengukur deformasi pada jarak-jarak 0; 0,05; dan 0,125 m dari pusat pelat atau pada titik-titik A, B, C, D, E (Gambar 1). Pengaturan uji beban pada pelat yang didukung kolom-kolom dilhatkan dalam Gambar 2.



Gambar 1 Model sistem pelat yang didukung kolom-kolom.

Model Numerik

Pemodelan dilakukan untuk membandingkan beban dan deformasi vertikal hasil simulasi 2D dengan menggunakan PLAXIS 8.2. Geometri model 2D ditunjukkan pada Gambar 3. Jumlah elemen (*mesh*) yang digunakan pada mode 2D adalah 500 elemen. Untuk model elemen hingga, tanah dimodelkan dengan model *undrained Hardening Soil* (HS), dan pelat dengan model *linear-elastic*, serta material kolom dimodelkan sebagai *non-porous*. Pada model numerik ini, lapisan tanah dan struktur dimodelkan sebagai *plane-strain*. Data parameter kuat geser tanah diperoleh dari uji triaksial UU, dan

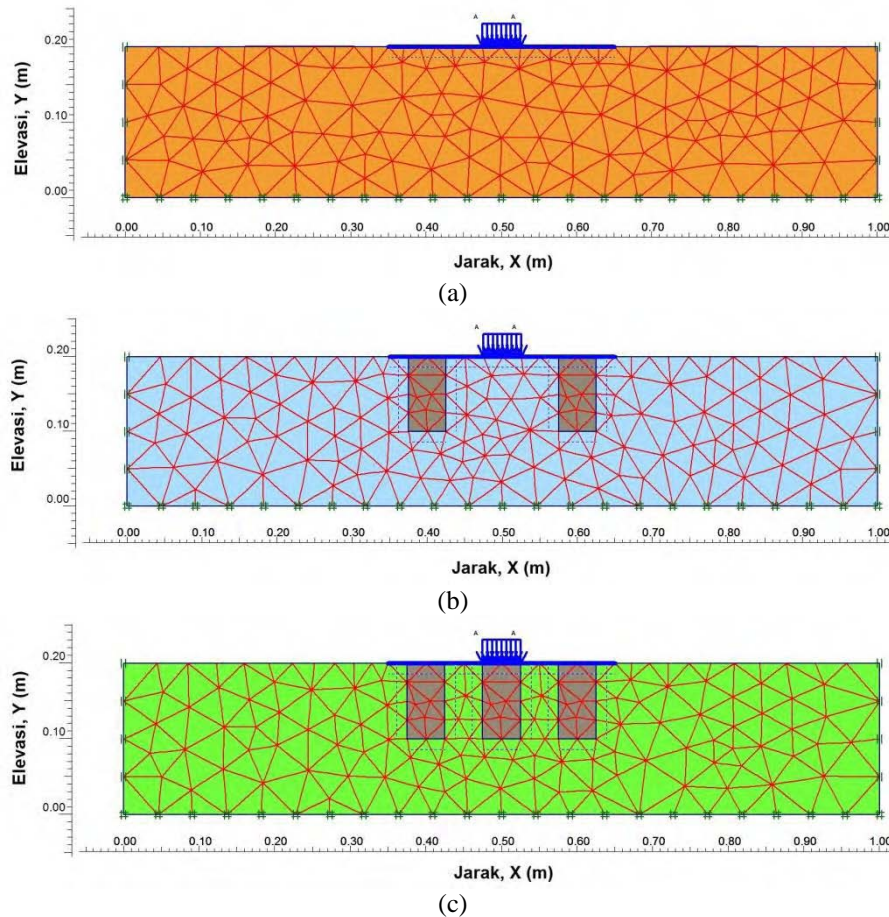
modulus elastisitas kolom ditentukan dari uji kuat tekan bebas. Nilai modulus elastisitas kolom $E_{ref} = 5,5 \times 10^5$ kPa dan angka poisson $\nu = 0,3$. Parameter tanah yang digunakan untuk model PLAXIS disajikan pada Tabel 1. Parameter nilai-nilai modulus elastisitas (E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} , E_{ur}^{ref}) ditentukan dengan cara *trial and error*. Untuk masukan awal, nilai-nilai tersebut diperkirakan dari kurva tekanan dan defleksi hasil pengamatan laboratorium. Tahapan pembebanan dalam PLAXIS dilakukan dengan mengikuti tahapan pembebanan pada data uji beban laboratroium. Kemudian keluaran perhitungan PLAXIS digambarkan dalam kurva tekanan dan defleksi pelat. Hasil penggambaran ini dibandingkan terhadap hasil uji beban laboratorium. Bila didapatkan hasil kurva teakanan dan defleksi yang berbeda cukup besar maka perhitungan PLAXIS diulangi dengan menyesuaikan nilai-nilai modulus elastisitas lapisan tanah. Analisis dilakukan berulang-ulang secara sistematis hingga kurva tekanan dan defleksi dari hasil analisis PLAXIS sama dengan atau cocok (*match*) dengan kurva uji beban laboratorium. Nilai-nilai E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} , E_{ur}^{ref} yang disajikan pada Tabel 1 merupakan hasil terbaik (*best-fit*) dari analisis balik PLAXIS.



Gambar 2 Pengaturan uji model laboratorium.

Tabel 1 Data parameter material yang digunakan dalam Plaxis 8.2

Nama/symbol	Model Laboratorium			Satuan
	Tanpa kolom	2 Kolom (K1)	3 Kolom (K2)	
Model material	Hardening Soil	Hardening Soil	Hardening Soil	-
Kondisi material	Undrained	Undrained	Undrained	
Berat volume kering γ_{unsat}	17	17	17	kN/m ³
Berat volume jenuh, γ_{sat}	20	20	20	kN/m ³
Modulus elastisitas, E_{50}^{ref}	718,75	3317,3	1437,5	kPa
Modulus elastisitas pemampatan, E_{oed}^{ref}	575	2653,8	1150	kPa
Modulus elastisitas <i>unloading/reloading</i> , E_{ur}^{ref}	3000	4000	4000	kPa
Angka poisson <i>unloading/reloading</i> , ν_{ur}	0,495	0,495	0,495	
Koefisien kekakuan, m	1	1	1	
Kohesi tanah, c	20	20	20	kPa
Sudut gesek internal tanah, ϕ	0	0	0	°
Interface, R_{inter}	1	1	1	-



Gambar 3 Pemodelan sistem fondasi pelat fleksibel dan kolom-kolom dengan PLAXIS 8.2 (a) pelat tanpa kolom, (b) pelat dengan dua kolom, dan (c) pelat dengan tiga kolom.

Kondisi awal tegangan-tegangan dalam tanah (*initial condition*) dihitung dengan menggunakan prosedur K_0 (K_0 -procedure) dan tekanan air dihitung secara langsung berdasarkan tekanan freatik. Penghitungan prosedur iterasi dilakukan sebagai *plastic calculation* dengan pengaturan standar dalam PLAXIS. Penghitungan dibagi menjadi dua tahap konstruksi (*stage of construction*) yaitu aktivasi kolom-kolom dan pelat, serta pembebanan yang menggunakan *multiplier increment*.

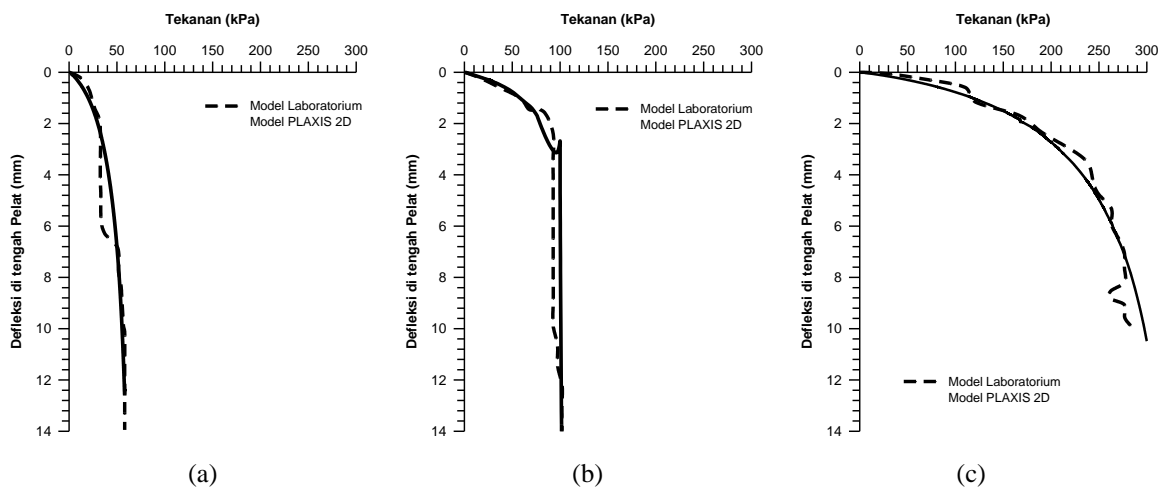
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perilaku sistem fondasi dengan kolom-kolom

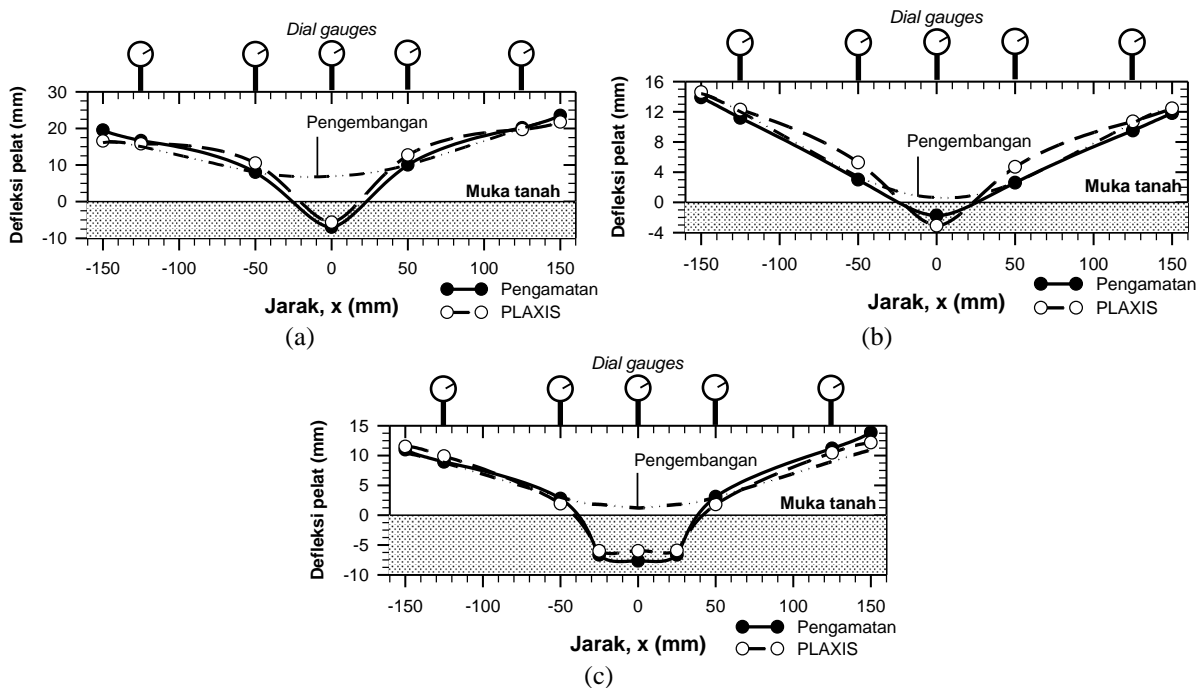
Perilaku sistem fondasi pelat fleksibel yang didukung oleh kolom-kolom terhadap beban yang bekerja di atasnya seperti disajikan pada Gambar 4. Secara umum, defleksi pelat bertambah besar dengan bertambahnya tekanan atau beban yang bekerja di atas pelat. Hasil simulasi numerik dengan PLAXIS terlihat jelas dalam Gambar 4 memberikan hasil yang lebih dekat dengan hasil pengamatan laboratorium. Perbedaan hasil analisis numerik dengan pengamatan laboratorium dapat dinyatakan dalam *normalized root mean square deviation (NRMSD)*. Untuk setiap nilai defleksi yang ditinjau, nilai *NRMSD* analisis numerik dan pengamatan laboratorium adalah 12,8% untuk model tanpa kolom; 9,9% untuk model pelat dengan dua kolom, dan 16,9% untuk model pelat dengan tiga kolom. Dari kurva hubungan tekanan dan defleksi, untuk pelat yang tidak didukung oleh kolom (Gambar 4a), tekanan maksimum yang dapat diterima oleh sistem fondasi adalah sebesar 58 kPa. Pemasangan dua kolom dibawah pelat meningkatkan kuat dukung menjadi 102 kPa (Gambar 4b). Kuat dukung sistem fondasi meningkat hingga mencapai 276 kPa dengan pemasangan tiga kolom (Gambar 4c). Hasil ini menunjukkan bahwa pemasangan kolom-kolom dapat meningkatkan kuat dukung dari sistem fondasi.

Gambar 5 memberikan ilustrasi perilaku defleksi pelat baik tanpa kolom dan yang didukung oleh kolom-kolom akibat beban maksimum yang bekerja di atasnya (P_u). Sebelum pembebanan, pelat mengalami defleksi ke atas akibat tekanan pengembangan selama enam hari penjuanan. Untuk pelat tanpa kolom terjadi defleksi di tengah pelat sebesar 7 mm akibat pengembangan (Gambar 5a). Tekanan ke atas yang dapat ditahan adalah 22 kPa. Pemasangan kolom-kolom mampu mengurangi defleksi di tengah pelat menjadi 0,63 mm dan 1,2 mm masing-masing untuk dua dan tiga kolom (Gambar 5b dan 5c). Tekanan ke atas yang dapat ditahan masing-masing sebesar 59 kPa dan 63 kPa untuk dua dan tiga kolom.

Hasil analisis balik dengan PLAXIS menunjukkan bahwa defleksi pelat hasil analisis numerik dan pengamatan laboratorium memiliki pola yang sama. Nilai *NRMSD* defleksi pelat untuk masing-masing model adalah 18%, 51%, dan 20% masing-masing untuk model tanpa kolom, dengan dua kolom, dan tiga kolom.



Gambar 4 Hubungan tekanan dan deformasi di tengah pelat hasil uji model laboratorium dan model numerik (a) tanpa kolom, (b) dengan 2 kolom, (c) dengan 3 kolom.



Gambar 5 Defleksi pelat akibat beban maksimum yang bekerja (a) tanpa kolom, $P_u = 58$ kPa, (b) dua kolom, $P_u = 102$ kPa, (c) tiga kolom, $P_u = 276$ kPa.

Pembahasan

Peningkatan kuat dukung pada sistem fondasi pelat yang didukung kolom-kolom dapat dijelaskan dengan prinsip *beam on elastic foundation* (BOEF) oleh Hetenyi (1964). Pada saat pelat dibebani dengan beban terpusat, maka pelat akan terdefleksi yang diikuti dengan berotasinya kolom-kolom di sekitar beban. Kolom-kolom di dekat beban mengalami rotasi terbesar. Rotasi ini akan memobilisasi tekanan tanah di sekitar kolom. Gaya-gaya perlawanan tanah di sekitar kolom mereduksi defleksi pelat. Besarnya gaya-gaya perlawanan ini bergantung pada kondisi tanah (kepadatan, kuat geser) dan dimensi (panjang dan besar) serta jarak antar kolom. Pada penelitian ini terbukti bahwa jarak antar kolom memberikan pengaruh terhadap kuat dukung dan defleksi pelat. Dalam teori BOEF, besar dan distribusi modulus reaksi tanah dasar (k_s) memberikan pengaruh terhadap perilaku. Namun dalam pendekatan teori kontinum (*continuum approach*), nilai modulus elastisitas (E) dan angka poisson (ν) merupakan dua parameter penting yang mempengaruhi gaya-gaya perlawanan pada fondasi (Biot, 1937).

Hasil analisis balik dengan PLAXIS menunjukkan bahwa pemodelan dengan *Hardening-soil* (HS) mampu memodelkan perilaku pelat dan kolom-kolom dalam menerima beban. Penyimpangan yang besar antara defleksi hasil analisis PLAXIS dan pengamatan laboratorium dapat disebabkan oleh pengaruh interaksi pelat dan tanah serta kolom dan tanah. Dalam pemodelan PLAXIS, gaya-gaya dan defomasi pada elemen struktur seperti *plate* dipengaruhi oleh pengaturan pada nilai interaksi tanah – tiang (R_{inter}). Untuk menghasilkan perilaku yang lebih realistis pada model 2D, beberapa peneliti (Sluis, 2012; Tschuchnigg dan Schweiger, 2013; Dao, 2011; Phung, 2010; Ryltenius, 2011) menyebutkan nilai R_{inter} harus diatur sedemikian rupa sebagai elemen pegas non-linier (*non-linear spring*). Akan tetapi, dalam naskah ini tidak dikaji pengaruh nilai R_{inter} terhadap model yang dikaji.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang dilakukan, dapat dirumuskan kesimpulan sebagai berikut :

- Pemasangan kolom-kolom mampu mengurangi defleksi di tengah pelat dari 7 mm menjadi 0,63 mm dan 1,2 mm masing-masing untuk dua dan tiga kolom akibat tekanan pengembangan.
- Pemasangan kolom-kolom dapat meningkatkan kuat dukung dari sistem fondasi. Tekanan atau beban maksimum yang dapat diterima oleh sistem fondasi tanpa didukung kolom adalah sebesar 58 kPa. Pemasangan dua dan tiga kolom dibawah pelat meningkatkan kuat dukung menjadi 102 kPa dan 276 kPa.
- Hasil analisis balik dengan PLAXIS menunjukkan bahwa pemodelan dengan *Hardening-soil* (HS) mampu memodelkan perilaku pelat dan kolom-kolom dalam menerima beban. Defleksi pelat hasil analisis numerik dan pengamatan laboratorium memiliki pola yang sama. Nilai *NRMSD* defleksi pelat untuk masing-masing model adalah 18%, 51%, dan 20% masing-masing untuk model tanpa kolom, dengan dua kolom, dan tiga kolom.

UCAPAN TERIMA KASIH

Naskah yang disajikan ini merupakan bagian dari skim Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi. Terima kasih disampaikan kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (Ditlitabmas), Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan yang telah memberikan dana penelitian pada Tahun Pertama 2014.

DAFTAR PUSTAKA

- Adam, A., Ibrahim, I., Alhardllo, A., Hadi, A., Ibrahim, M., 2012, Effect of hydrated lime on behavior of expansive soil as subgrade of flexible pavement structural system, Proceeding The 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials: Design, Performance, and Application, Wuhan, China, 18-22 October 2012, pp. 64-76
- Baker, S., 2000, Deformation behavior of lime/cement stabilized clay. Thesis for Ph.D, Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Göterberg, Sweden.

- Biot, M.A., 1937, Bending of an Infinite Beam on an Elastic Foundation. *Journal of Applied Mechanics*, Trans. Am. Soc. Mech. Eng., Vol. 59, 1937, pp. A1-A7.
- Budi, G.S., 2003, Penyebaran kekuatan dari kolom yang terbuat dari limbah karbit dan kapur. *Jurnal Dimensi Teknik Sipil*, Vol. 5 No. 2: 99-102.
- Dao, T.P.T., (2011). *Validation of PLAXIS Embedded Piles For Lateral Loading*. MSc Thesis, Delft University of Technology.
- Daud, S., Junica, M.I., Sunaryo, M.E., Pertiwi, D., 2009, Kajian dan monitoring hasil uji coba skala penuh teknologi Cakar Ayam Modifikasi, Kolokium Hasil Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan Tahun 2009, Badan Penelitian dan Pengembangan Jalan, Kementerian Pekerjaan Umum, pp. 244-284.
- Hardiyatmo, H.C., 2009, Metode hitungan lendutan pelat dengan menggunakan modulus reaksi tanah dasar ekuivalen untuk struktur pelat fleksibel. *Jurnal Dinamika Teknik Sipil*, Vol. 9(2), pp. 149-154.
- Hetényi M., 1964, *Beams on Elastic Foundation: Theory with Applications in the Fields of Civil and Mechanical Engineering*. Univ. of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan.
- Kempfert, H.G., 2003, Ground improvement methods with special emphasis on column-type techniques, In Vermeer, Schwiger, and Cudny (Eds.), *Proceeding of International Workshop on Geotechnics of Soft Soil: Theory and Practice*, Netherlands, Verlag Glückauf, 101-112.
- Muntohar, A.S., 2006, The swelling of expansive subgrade at Wates - Purworejo roadway STA. 8+127, *Civil Engineering Dimension*, Vol. 8(2), pp. 106 – 110.
- Muntohar, A.S., Liao, H.J., 2006, Strength distribution of the soil surrounding lime-column, In Chan, D., and Law, K.T. (Eds.) : *Proceeding 4th International Conference on Soft Soil Engineering*, 2-6 October 2006, Vancouver, Canada, 315-319.
- Phung, D.L., (2010). “Piled Raft – A Cost-Effective Foundation Method for High- Rises”. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, Vol. 41(3), 1-12.
- Porbaha, A., Zen, K., Kobayashi, M., 1999, Deep mixing technology for liquefaction mitigation, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 5 No. 1, 21-34.
- Prabowo, D.R., 2010, Analisis ekonomi perkerasan lentur dan perkerasan menggunakan pile slab pada ruas jalan Babat-Bojonegoro, Tugas Akhir RC09 1380, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Rogers, C.D.F., Glendinning, S., 1997, Improvement of clay soils in situ using lime piles in UK, *Engineering Geology*, Vol. 47, 243-257.
- Ryltenius, A. (2011). *FEM Modelling of piled raft foundations in two and three dimensions*, Master’s Dissertation, Lund University, Sweden.
- Sahoo, J.P., Pradhan, P.K., 2010, Effect of lime stabilized soil cushion on strength behaviour of expansive soil, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 28, pp. 889–897
- Shen, S.L., Miura, N., dan Koga, H., 2003. Interaction mechanism between deep mixing column surrounding clay during installation. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40: 293-307.
- Sluis, J. (2012). *Validation of embedded pile row in PLAXIS 2D*. MSc thesis. Delft University of Technology.
- Tono, M.C., Gokceoglu, C., dan Ulusay, R., 2003, A laboratory-scale experimental investigation on the performance of lime in expansive Ankara (Turkey) clay, *Bulletin Engineering Geology & Environmental*, Vol. 62, 91-106.
- Tschuchnigg, F., and Schweiger, H.F. (2013). “Comparison of Deep Foundation Systems using 3D Finite Element Analysis Employing Different Modeling Techniques”, *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, Vol. 44 (3), 40-46.
- Widajat, D., Suherman, 2008, Evaluasi penanganan kerusakan perkerasan jalan diatas tanah ekspansif, Kolokium Hasil Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan Tahun 2009, Badan Penelitian dan Pengembangan Jalan, Kementerian Pekerjaan Umum. (CD-ROM)

Lampiran B

NASKAH SEMINAR
INTERNASIONAL
Southeast Asian
Conference on Soft
Soils and Ground
Improvement (Soft
Soils 2014),
Bandung 21–23
Oktober 2014.

Penelitian Unggulan
Perguruan Tinggi
(Tahun ke-1)

IMPROVEMENT OF EXPANSIVE SUBGRADE USING COLUMN TECHNIQUE OF CARBIDE LIME AND RICE HUSK ASH MIXTURES

Agus Setyo Muntohar ¹

ABSTRACT: Pavement deficiencies on expansive clay have been found as the result of the heave and shrink effect of the expansive soil during seasonal period. This paper presents a result of the utilization of carbide lime and rice husk ash mixture for improving performance of expansive soil. The carbide lime and rice husk ash was mixed to form SiCC columns in expansive soil. Application of the SiCC column supported flexible pavement was investigated numerically using finite element method. Two column shapes that are conventional (O-Shape) and enlarged column cap (T-Shape) were investigated in axi-symmetric model. The soil was modeled to have about 5% swelling, while 80 kN standard axle load was applied on pavement surface. The results show that the T-Shaped column can improve the settlement stability of soil between columns remarkably, while narrowing column spacing can reduce the settlement of soil effectively. A columns spacing of 3D to 5D is reasonable to reduce maximum settlement of the pavement due to heave and vehicle load.

Keywords: expansive soil, flexible pavement, SiCC column, finite element, heave.

INTRODUCTION

Expansive soils are the soils which swell significantly when come in contact with water and shrink when the water squeezes out. The severity of damages done by expansive soil has been well documented in literature worldwide (Chen, 1988; Nelson and Miller, 1992; Gourley et al., 1993). Expansive soils are frequently encountered in the Indonesia lowland in areas where favorable environments exist. Muntohar (2006) found the deterioration of a road section at Sta. 8 + 127 of the Purworejo-Wates road which is a national highway at south-path. Pavement deficiency on expansive clay was also found in Cikampek highway (Abadi, 2007). Some traditional methods using lime, fly ash, cement, and any other chemical materials have been introduced to stabilized the expansive soil to enhance the strength and reduce the expansiveness. An innovation method using Cakar Ayam Modifikasi (CAM) has been investigated by Hardiyatmo and Suhendro (2010) as an monolithic continuous reinforced rigid pavement and short pile system on expansive soil.

Lime-column or lime pile and lime/cement column reinforced expansive soil has been studied by Swamy (2000), Tono et al., (2003), Muntohar (2003), Rao and Thyagaraj (2003). The technique was adopted from mini pile foundation to control the heave and deformation (Hewayde et al. (2005). The application of the lime-column can be extended to reinforce flexible pavement system on expansive soil. However, use of lime, that produces from calcinations and hydration of calcium

carbonate, needs a huge amount of limestone quarry. Excavation the limestone can trigger environment decay. Utilization industrial waste enriched lime e.g. carbide waste is a benefit for environment and construction. Abundant of another solid waste such as rice husk ash, can be mixed with carbide lime to form a cementitious materials. The shear strength properties of the carbide lime and rice husk mixture to improve expansive clay has been studied intensively by Diana et al. (2012) and Muntohar et al. (2014).

Based on the previous results, this paper presents a result of the utilization of carbide lime and rice husk ash mixture for improving performance of expansive soil. The carbide lime and rice husk ash was mixed to form SiCC columns in expansive soil. Application of the SiCC column supported flexible pavement was

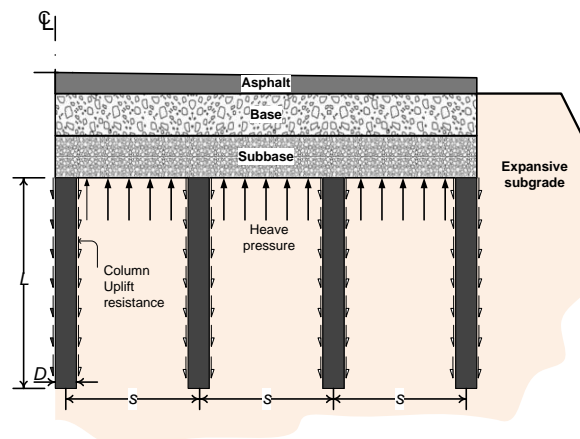


Figure 1 Principle of SiCC column supported flexible pavement

¹ Department of Civil Engineering, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jl. Lingkar Selatan Taman Tirto, Yogyakarta, INDONESIA. Email: muntohar@umy.ac.id

investigated numerically using finite element method. The main objective of the study is to investigate the deformation of the SiCC column system reinforced flexible pavement due to heave of expansive soil and to obtain an optimum column size and spacing column to column. The principle of SiCC column supported flexible pavement is illustrated in Figure 1.

NUMERICAL ANALYSIS

Soil Models and Parameters

The behavior of a subgrade reinforced with either a group of SiCC column was investigated in this paper using numerical analyses. The case was analyzed as an axi-symmetric problem using PLAXIS 2D software. The model is shown in Figure 2. Two column shapes that are O-Shape and T-Shape models were investigated in the numerical simulation. The O-Shape column is a circular column with diameter of 0.15 m (Figure 2a). The T-Shape column is a circular column of 0.15 m in diameter (D) and enlarged column cap of 0.3 m in diameter. The length of enlarged column cap is 0.3 m (Figure 2b). The total length of the column was 1 m. The center to center columns spacing was varied into 3D, 5D, 6D, 9D, and 13D.

The expansive clay, the column and pavement materials (subbase, base, and asphalt layer) were modeled using the hardening soil model (HS) in PLAXIS (Schanz et al., 1999). The material properties used in the finite element analyses is presented in Table 1. The pavement subjected to standard axle load 80 kN that is equivalent to 400 kPa pressures at each wheels. The load configuration is shown in Figure 2.

Modeling Soil Heave

Heave of the expansive clay was modeled by applying a volumetric strain to the reactive clay layer. For simplicity, in the analyses presented herein, the 5% volumetric strain was applied uniformly across the full thickness of the clay layer. However in reality, the swelling rate of expansive clay would normally expand depends on the location from the source of moisture and magnitude of overburden pressure. For comparison the heave effect, the pavement model without columns was also simulated in this study. The variation of heave is observed at three locations that are at column tip (A), column cap (B), and pavement surface (C).

RESULTS AND DISCUSSION

In this research the effect of heave is discussed in two conditions (1) without load, and (2) with load. The first condition refers to a condition before opening the traffic, while the last represents a condition with traffic.

Behavior Due To Heave

The behavior of the SiCC column reinforced pavement system due to heave before applying vehicle load (condition 1) is illustrated in Figure 3. In general, the highest heave occur at pavement surface, and decreases with depth. The pavement without columns experiences to have maximum uplift deformation at the edge side. The uplift deformation at centerline of roadway is about 0.11 m to 0.16 m and increases to about 0.12 m to 0.17 m at the edge side of pavement. Installing SiCC columns reduces the heave at subgrade. Reverse arching pattern was observed at subsoil as shown in Figure 3a and 3b. At the columns tip, the heave is greater than the heave without columns support. But, the heave of soil between columns decreases. For this case, the SiCC column was not installed into passive

Table 1. Material properties used in the finite element analyses

Parameter	Expansive Soil	SiCC Column	Subbase layer	Base layer	Asphalt
γ_{unsat} (kN/m ³)	17	17	22	21	25
γ_{sat} (kN/m ³)	20	20	24	23	25
E_{50}^{ref} (MPa)	0.718	3.317	200	400	4×10^3
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ (MPa)	0.575	2.653	220	440	4.4×10^3
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ (MPa)	3	4	1×10^3	2×10^3	2×10^4
ν_{ur}	0,495	0,495	0.35	0.45	0.4
m	1	0.5	0.5	0.5	0.5
c' (kPa)	57	43	20	30	30
ϕ' (degree)	15	46	40	40	40

Note: E_{50}^{ref} is the deformation modulus at 50% of strength at reference pressure $p^{(\text{ref})}$; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ is the unload-reload deformation modulus at reference pressure; $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ is the incremental constrained modulus at reference pressure; ν_{ur} is the unload-reload Poisson's ratio; m defines dependency of stiffness on lateral effective stress

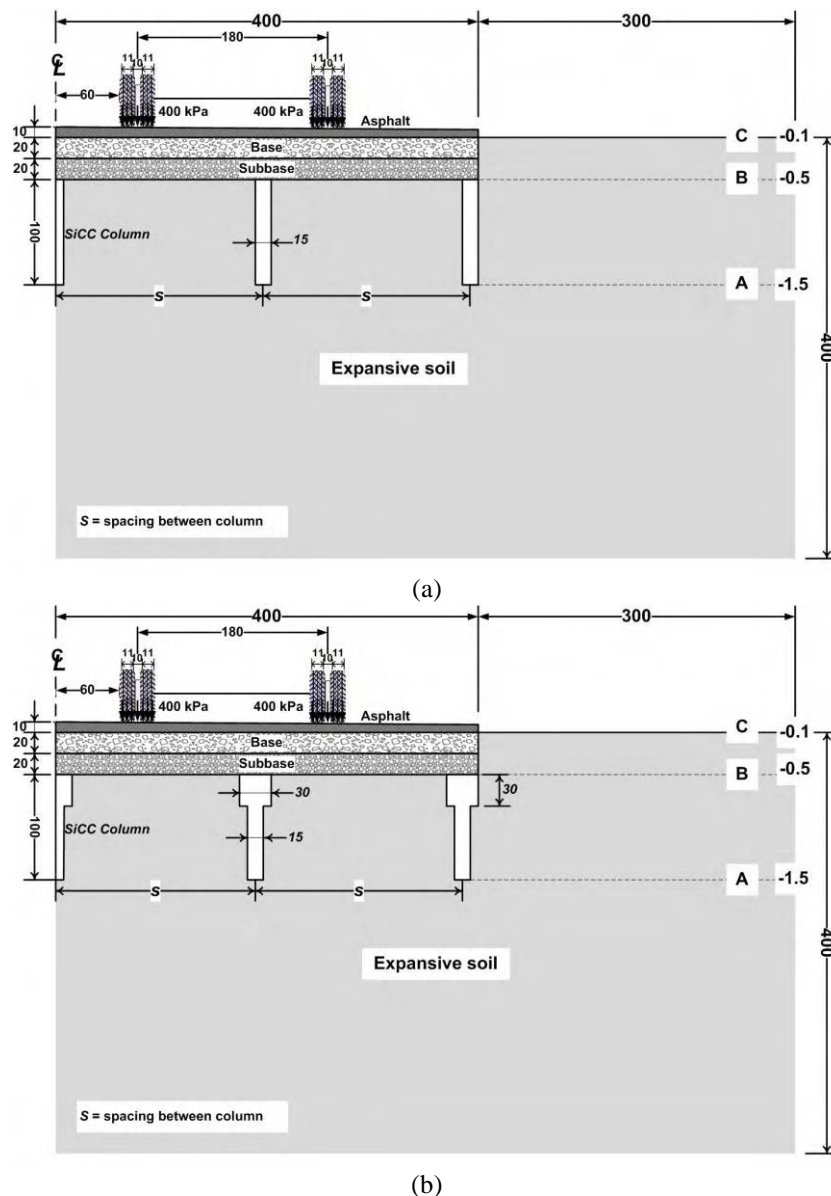


Figure 2 The model of SiCC columns supported flexible pavement on expansive soil, (a) circular shape column (O - Shape), and (b) circular shape with enlargement of column head (T-Shape).

zone, hence the columns behave as floating pile. As the result, the columns experience to move vertically. However in general, this behavior illustrates that the SiCC columns supported flexible pavement can prevent the soil to experience extreme heave.

As mentioned previously, at the pavement surface, the deformation due to heave increase to the edge side of pavement. The SiCC lime columns reduced the deformation from 0.17 m to 0.15 m at the near edge side (Figure 3c). But, the deformation at the centerline of roadway increase from 0.16 m to 0.165 m. This result indicates that modeling heave effect of columns supported flexible pavement was a complex soil-structure interaction problem. A similar behavior was observed for piled embankment on soft soil as studied in Satibi (2009) and Poulos (2007).

Behavior Due To Heave and Vehicle Load

Figure 4 shows the deformation of SiCC supported flexible pavement due to heave and vehicle load. In general, the pavement goes to settle from the centerline of roadway to a distance of 3 m and the upward deformation was observed at the rest section. Without the SiCC column, the pavement structure experiences an extreme settlement and upward movement under the applied load. Installing the SiCC column can reduce and maintain the settlement of subsoil (Figure 4a and 4b) and pavement surface (Figure 4c). It should be noted that extreme upward deformation at the edge side because of the combination of heave and loading that depends on the soil model and parameter. The higher the soil strength parameters and soil stiffness the lower the

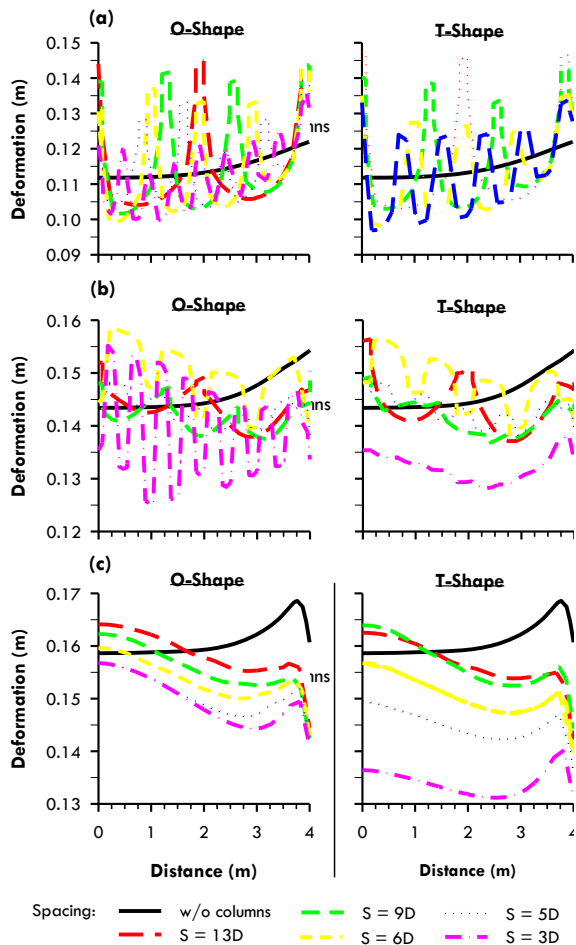


Figure 3 Heave simulated from FEM (a) at depth -1.5 m (column tip), (b) depth -0.5 (column cap) and (c) pavement surface.

maximum and differential settlement at the subsoil and pavement surface (Jenck et al., 2007).

Effect of Column Spacing

Figure 5 shows relationship between the spacing and heave of subgrade (location B) and pavement surface (location C) at centerline of roadway. Results show that narrowing column distance can reduce the heave at the pavement (Figure 5a) and subgrade (Figure 5b). It was found that heave reduces as column spacing reduces. Column spacing of 5D is reasonable in terms of heaving control and economic purposes. Narrowing columns distance can reduce the heave of soil effectively. A closer spacing results in arching effect at subgrade. Zhang et al. (2010) mentioned that horizontal displacement on neighboring piles induced the deformation of soil between the piles. In this study, arching heave effect was found when the spacing is smaller than six times of the column diameter (6D) as shown in Figure 4b and 5b.

Figure 6 shows the effect of columns spacing on the settlement of pavement at the centerline of roadway due

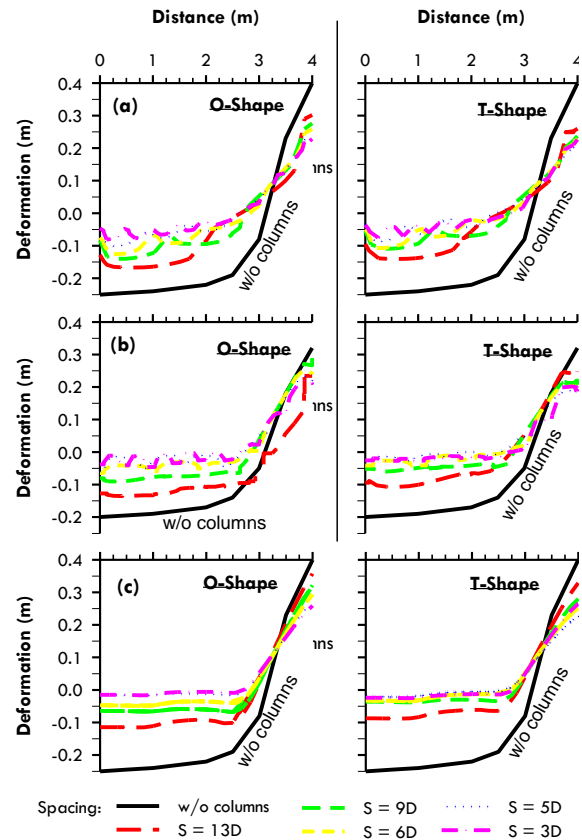


Figure 4 Deformation simulated from FEM (a) at depth -1.5 m (column tip), (b) depth -0.5 (column cap) and (c) pavement surface.

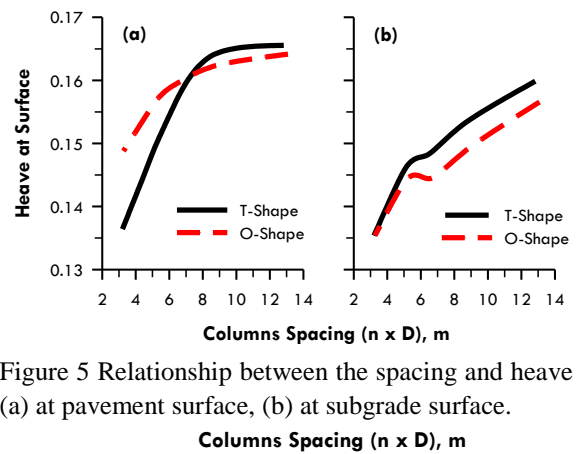


Figure 5 Relationship between the spacing and heave (a) at pavement surface, (b) at subgrade surface.

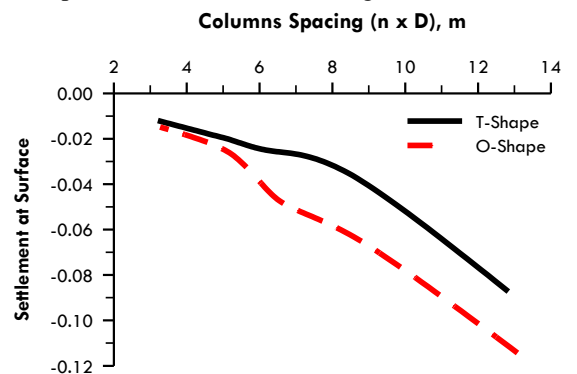


Figure 6 Relationship between the spacing and settlement of pavement surface due to heave and vehicle load.

to heave and vehicle load. Increasing column spacing obviously decreases the pavement load transferred to the columns. This leads to the decrease of efficacy and the increase of maximum and differential settlements and soil arching ratio of a column supported flexible pavement. A columns spacing of 3D is reasonable to reduce maximum settlement of the pavement due to heave and vehicle load as shown in Figure 6.

Effect of Enlarged Column Cap

Results in Figure 5 and 6 shows that enlarging the diameter of column cap (T-Shape column) can minimize heaving of expansive soils and improve the settlement stability of soil between columns remarkably. As shown in Figure 6, the settlement at the pavement surface reduces by double for T-Shape column if compare to conventional columns (O-Shape). The T-Shape column reduces significantly the settlement of the pavement due to the applied load. The effect of the enlarged column cap of the SiCC column is similar to the effect of increasing the percentage coverage of pile caps in rigid pile-supported embankments, which can increase pile efficacy and suppress differential settlement of ground surface (Han and Gabr, 2002), Liu et al. (2012). In this study, the column percentage coverage or the column area replacement ratio (a_s) of the T-Shape column is double of the O-Shape column.

CONCLUSIONS

The results of a series of axi-symmetric FE analyses to investigate the heave and settlement of flexible pavement supported by SiCC columns over a expansive subsoil have been reported. The analyses demonstrated that the centre-to-centre column spacing (S) is a key parameter to control heave and settlement. Increasing column spacing obviously decreases the pavement load transferred to the columns. This leads to the decrease of efficacy and the increase of maximum and differential settlements and soil arching ratio of a column supported flexible pavement. Enlarged column cap (T-Shape column) reduced significantly the settlement of the pavement due to the applied load. Narrowing columns spacing can reduce the settlement of soil effectively. A columns spacing of 3D to 5D is reasonable to reduce maximum settlement of the pavement due to heave and vehicle load.

ACKNOWLEDGEMENTS

This paper is part of the research project under a scheme of “Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi” in 2014. Author thanks to the research fund granted by

Ministry of Education and Culture, the Republic of Indonesia.

REFERENCES

- Abadi, T.C., (2007). Perbandingan Hasil Stabilisasi Dengan Fly Ash Dan Semen Pada Tanah Ekspansif Cikampek Jurnal Teknik Sipil 7(2): 131 – 143.
- Chen, F.H. (1988) Foundations on expansive soils, Elsevier Science publication, New York.
- Diana, W., Muntohar, A.S., and Rahmawati, A. (2012). Campuran Limbah Karbit – Abu Sekam Padi – Serat Plastik Untuk Perkuatan Struktur Timbunan Jalan Raya. Research Report “Penelitian Hibah Bersaing”, Department of Civil Engineering, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta (unpublished)
- Gourley, C.S., Newill, D., and Shreiner, H.D. (1993) Expansive soils: TRL’s research strategy, Proceeding of the 1st International Symposium on Engineering Characteristics of Arid Soils. City University, London, 5-8 July 1993.
- Han, J., and Gabr, M. A. (2002). Numerical analysis of geosynthetic reinforced and pile-supported earth platforms over soft soil. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 128(1): 44–53.
- Hardiyatmo, H.C., and Suhendro, B., (2010). Perilaku Sistem Cakar Ayam Modifikasi pada Tanah Ekspansif. Research Report “Program Insentif 2009 Kementerian Negara Riset dan Teknologi”, Department of Civil and Environmental Engineering, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta (unpublished)
- Hewayde, E, El Naggar, H., and Khorshid, N. (2005). Reinforced lime columns: a new technique for heave control. Proceedings of the ICE - Ground Improvement 9(2): 79 –87
- Jenck, O., Dias, D., and Kastner, R. (2007). Two-dimensional physical and numerical modeling of a pile-supported earth platform over soft soil. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(3): 295-305.
- Liu, S.Y., Du, Y.J., Yi, Y.L., and Puppala, A.J., (2012). Field Investigations on Performance of T-Shaped Deep Mixed Soil Cement Column-Supported Embankments over Soft Ground. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(6): 718–727.
- Muntohar, A.S., (2006). The Swelling Of Expansive Subgrade At Wates-Purworejo Roadway, STA. 8+127. Dimensi Teknik Sipil 8(2): 106 – 110.
- Muntohar, A.S., Rosyidi, S.A.P., Diana, W., and Iswanto (2014). Pengembangan Fondasi Perkerasan Lentur Jalan Dengan Kolom Eco Si-CC Pada Tanah Ekspansif. Research Report 1st Year 2014 “Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi”, Department of Civil

- Engineering, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta (unpublished)
- Nelson, D.J., and Miller, D.J. (1992) *Expansive soils, problems and practice in foundation and pavement engineering*, John Wiley and Sons, New York.
- Poulos, H. G. (2007). Design Charts for Piles Supporting Embankments on Soft Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 133(5): 493-501.
- Rao, S.M., and Thyagaraj, T. (2003). Lime slurry stabilisation of an expansive soil. *Proceedings ICE - Geotechnical Engineering* 156: 139–146
- Satibi, S. (2009) *Numerical Analysis and Design Criteria of Embankment on Floating Piles*. Institut für Geotechnik, Universität of Stuttgart.
- Schanz, T., Vermeer, P. A., and Bonnier, P.G. (1999). *The Hardening-Soil Model: Formulation and Verification*. In R.B.J. Brinkgreve (Eds.): *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, Balkema, Rotterdam, 281-290
- Swamy, V.B., (2000). *Stabilisation Of Black Cotton Soil By Lime Piles*. M.Sc.(Eng.) Thesis, Indian Institute of Science (unpublished).
- Tonoz M.C., Gokceoglu, C, and Ulusay, R. (2003). A laboratory -scale experimental investigation on the performance of lime columns in expansive Ankara (Turkey) Clay. *Bulletin of Engineering Geology and Environment* 62:91–106
- Zhang, T., Liu, H.L., Xu, X.T., and Dai, M. (2010) *Effects of PCC Pile Spacing on Expressway Embankment Settlement Control*. *Deep Foundations and Geotechnical In Situ Testing*: 325-332.

Lampiran C

UNDANGAN SEBAGAI
VISITING
PROFESSOR/SCIENTIST
Faculty of
Engineering, Kasetsart
University Bangkok,
Thailand .

Penelitian Unggulan Perguruan
Tingg
(Tahun ke-1)



Faculty of Engineering of Kasetsart University

Faculty of Engineering, Kasetsart University, 50 Pahonyothin BANGKOK,
THAILAND 10900 Tel. 0-2797-0999 Fax. 02-579-2265

www.eng.ku.ac.th

August 8, 2014

Dear Dr. Eng. Agus Setyo Muntohar,

In order to strengthen our academic collaboration further, I would like to invite Dr. Agus to visit the Department of Civil Engineering of Kasetsart University during the period between 15 August and 30 September 2014. During this period, Dr. Agus would be conducting laboratory experiments on unsaturated soils related to expansive soil and landslide problems in Indonesia. Some soil samples brought from Indonesia will be used for this purpose. In addition, Dr. Agus will also be expected to give lectures on various topics about Geotechnical Engineering application in Indonesia for undergraduate and post-graduate students.

I am sincerely thankful for your cooperation and look forward to seeing you.

Yours sincerely,

Apiniti Jotisankasa, Ph.D DIC

Head of Geotechnical Engineering Section

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand 10900

Lampiran D

REKAPITULASI PENGUNAAN DANA PENELITIAN

Penelitian Unggulan
Perguruan Tinggi
(Tahun ke-1)

Rekapitulasi Penggunaan Dana Penelitian

Judul : PENGEMBANGAN FONDASI PERKERASAN LENTUR
JALAN DENGAN KOLOM ECO Si-CC PADA TANAH
EKSPANSIF

Skema Hibah : Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi

Peneliti / Pelaksana
Nama Ketua : AGUS SETYO MUNTOHAR Ph.D
Perguruan Tinggi : Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
NIDN : 0514087501
Nama Anggota (1) : SRI ATMAJA PUTRA J N N R S.T., M.Sc.Eng, Ph.D
Nama Anggota (2) : WILIS DIANA S.T., M.T.
Nama Anggota (3) : ISWANTO
Tahun Pelaksanaan : Tahun ke 1 dari rencana 3 tahun
Dana Tahun Berjalan : Rp 75.000.000,00
Dana Mulai Diterima Tanggal : 2014-07-07

Rincian Penggunaan

1. HONOR OUTPUT KEGIATAN

Item Honor	Volume	Satuan	Honor/Jam (Rp)	Total (Rp)
1. Honor peneliti (3 bulan)		jam		
			Sub Total (Rp)	0

2. BELANJA BAHAN

Item Bahan	Volume	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Total (Rp)
1. Buku referensi	7.00	buku	31.000	217.000
2. Kotak model	1.00	unit	8.500.000	8.500.000
3. Komponen dial gauge	10.00	unit	1.470.000	14.700.000
4. Komponen dial gauge dan alat pematatan	11.00	unit	295.455	3.250.000
5. Acrylic flexiglass	4.00	lembar	196.750	787.000
6. Perlengkapan penelitian: Tong dan ember	8.00	buah	96.250	770.000
7. Perlengkapan penelitian: besi siku, cat, pipa	6.00	unit	401.333	2.408.000
8. Perlengkapan penelitian: pipa PVC, elevan, sikat	3.00	unit	20.167	60.500
9. Perlengkapan penelitian: mur, baut, lem	3.00	unit	12.400	37.200
10. Perlengkapan penelitian: plastik	1.00	set	14.000	14.000
11. Perlengkapan penelitian: baut, kaos tangan	2.00	unit	48.250	96.500
12. Perlengkapan penelitian: masker	1.00	box	30.000	30.000

Item Bahan	Volume	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Total (Rp)
13. Perlengkapan penelitian: komponen mesin penggiling	1.00	set	125.000	125.000
14. Perlengkapan penelitian: cat, thinner, lem	6.00	unit	19.000	114.000
15. Alat tulis	4.00	unit	4.075	16.300
16. Kertas dan alat tulis	9.00	unit	21.589	194.300
17. Catridge dan tinta printer	8.00	unit	225.000	1.800.000
18. Biaya uji XRD/SEM di ITS	1.00	set	8.850.000	8.850.000
19. Sabun pembersih tangan	1.00	botol	8.200	8.200
20. Biaya makan/minum	3.00	botol	6.400	19.200
21. Biaya makan/minum	2.00	botol	9.850	19.700
22. Biaya makan/minum	3.00	set	16.333	49.000
			Sub Total (Rp)	42.065.900

3. BELANJA BARANG NON OPERASIONAL LAINNYA

Item Barang	Volume	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Total (Rp)
				0
			Sub Total (Rp)	0

4. BELANJA PERJALANAN LAINNYA

Item Perjalanan	Volume	Satuan	Biaya Satuan (Rp)	Total (Rp)
1. Pengambilan Tanah	20.00	liter	6.500	130.000
2. Pengambilan karbit/abu sekam padi	15.40	liter	6.500	100.100
			Sub Total (Rp)	230.100

Total Pengeluaran Dalam Satu Tahun (Rp) 42.296.000,00



Mengetahui,

(Hilman Latif, MA., Ph.D.)
NIP/NIK 19750912200004153019

Yogyakarta, 24 - 8 - 2014
Ketua,


(AGUS SETYO MUNTOHAR Ph.D)
NIP/NIK 19750814019994012304

REKAPITULASI PENGGUNAAN DANA PENELITIAN

No.	Komponen	Biaya (Rp)	No. Bukti
A	Bahan dan Alat Penelitian		
1	Kotak model :	8.500.000	A.1 Kuitansi tanggal 12-8-2014
2	Pengambilan Tanah	130.000	A.2 Kuitansi tanggal 13-8-2014
3	Pengambilan karbit/abu sekam padi	100.000	A.3 Kuitansi tanggal 16-08-2014
4	Buku referensi	217.000	A.4 Kuitansi tanggal 30-06-2014
5	Komponen dial gauge dan alat pemadatan	14.700.000	A.5 Kuitansi tanggal 10-7-2014
		3.250.000	A.6 Kuitansi tanggal 18-8-2014
6	Acrylic flexiglass	787.000	A.7 Kuitansi tanggal 18-08-2014
7	Perlengkapan penelitian	770.000	A.8 Kuitansi tanggal 12-08-2014
		2.408.000	A.9 Kuitansi tanggal 19-07-2014
		60.500	A.10 Kuitansi tanggal 11-07-2014
		37.200	A.11 Kuitansi tanggal 16-08-2014
		14.000	A.12 Kuitansi tanggal 14-07-2014
		96.500	A.13 Kuitansi tanggal 14-07-2014
		30.000	A.14 Kuitansi tanggal 10-07-2014
		125.000	A.15 Kuitansi tanggal 7-07-2014
		114.000	A.16 Kuitansi tanggal 13-08-2014
B	Alat-alat tulis, kertas dan kantor	16.300	B.1 Kuitansi tanggal 11-07-2014
		194.300	B.2 Kuitansi tanggal 18-08-2014
		1.800.000	B.3 Kuitansi tanggal 16-08-2014
C	Biaya pengujian laboratoium:		
1	Biaya uji XRD/SEM di ITS	8.850.000	C.1 Bukti transfer tanggal 25-07-2014
2	Biaya makan-minum	8.200	C.2 Kuitansi tanggal 15-07-2014
		12.800	C.3 Kuitansi tanggal 16-07-2014
		19.700	C.4 Kuitansi tanggal 17-08-2014
		49.000	C.5 Kuitansi tanggal 18-08-2014
	JUMLAH	42.199.800	84%
	Sisa dana	7.800.200	Untuk komponen penulisan laporan dan jurnal serta seminar, serta biaya laboratorium