



LAPORAN KOLABORASI PENELITIAN

PARAMETER TANAH KOMPOSIT DARI MODEL KOLOM
TANAH SEMEN PADA LAPISAN TANAH DASAR DOUBLE
TRACK KERETA API DI ATAS TANAH LEMPUNG LUNAK

Content

1. SURAT PENUGASAN
2. LAPORAN PENELITIAN
3. PUBLIKASI HASIL PENELITIAN (Journal)

MARET 2024

Our Reference : UTM.K.08.00.00/12.23/1/6/1 Jld.11 (2)
Date : 16 January 2023

Dr. Ir. Idrus Muhamad Alatas
Institut Sains dan Teknologi Nasional
JK. Moch. Kahfi II Srengseng Sawah
Jakarta, Jakarta Selatan
12640, Indonesia

Dear Dr.,

APPOINTMENT AS AN EXTERNAL CO – SUPERVISOR

Due to your expertise in the field of research, it is a pleasure for us to appoint you as the External Co-Supervisor of the following candidate at Universiti Teknologi Malaysia:-

Name of Candidate : Antonius Setiawan
Program of Study : Doctor of Philosophy
Department/Faculty : Razak Faculty of Technology and Informatics
Supervisor (Main) : Assoc. Prof. Dr. Samira Albati binti Kamaruddin

We would appreciate if you can confirm your acceptance of this appointment by using the google form attached via the following link [<https://tinyurl.com/ExternalCoSVAcceptanceForm>] within two (2) weeks of the receipt of this letter.

Please note that the appointment does not incur any financial cost to the university.

We are looking forward to your active involvement in our graduate programme through this appointment.

Thank you.

“BERKHIDMAT UNTUK NEGARA”

I, who uphold trust,



(ASSOC. PROF. DR. ROHAIDA BASIRUDDIN)

Associate Chair
School of Graduate Studies
o.b. Chair

☎ : +603-2180 5178

✉ : rohaidabasiruddin.kl@utm.my

c.c.

Deputy Dean (Academic & Student Development)
Razak Faculty of Technology and Informatics

Supervisor (Main):

Assoc. Prof. Dr. Samira Albati binti Kamaruddin
Razak Faculty of Technology and Informatics

Student:

Antonius Setiawan
Razak Faculty of Technology and Informatics



LAPORAN PENELITIAN

PARAMETER TANAH KOMPOSIT DARI MODEL KOLOM TANAH SEMEN PADA LAPISAN TANAH DASAR *DOUBLE TRACK* KERETA API DI ATAS TANAH LEMPUNG LUNAK

Disusun Oleh:

DR. Ir. Idrus M. Alatas M.Sc (Team Leader- ISTN)

Prof. (madya) DR. Samira Albati Kamarudin (UTM-Kuala Lumpur)

Prof. Ir. DR. Ramli Nazir (UTM- Johor Bahru)

Ir. Antonius Setiawan M.BA (Ph.D Candidate UTM- PT.BPI)

Ir. Yuama I Basarah Ph.D (PT. BAUER Pratama Indonesia)

Ir. Wawan Kusmaya MT (Dosen S-1- ISTN)

Marco Ibrahim ST (Mahasiswa Magister Teknik Sipil ISTN)

Randityo Suryoputro Widiutomo ST (PT. BAUER Pratama Indonesia)

KERJASAMA PENELITIAN ANTARA

Lembaga Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat (LPPM-ISTN)

Dengan

Universiti Teknologi Malaysia (UTM)

Dan

PT. BAUER PRATAMA INDONESIA (PT.BPI)

MARET 2024

DAFTAR ISI

BAB 1 PENDAHULUAN	7
1.1 Pendahuluan	7
1.2 Latar Belakang Penelitian.....	7
1.3 Pernyataan Masalah.....	11
1.4 Tujuan dan Objektif Penelitian.....	12
1.5 Lingkup Penelitian.....	13
1.6 Kepentingan Penelitian.....	15
1.7 Pengaturan Penelitian	16
BAB 2 PENELITIAN LITERATUR.....	18
2.1 Pendahuluan	8
2.2 Tiang inklusi (<i>Rigid Inclusion</i>).....	221
2.2.1 Konsep Tiang inklusi	221
2.2.2 Pindah Beban ke Kepala Kemasukan	22
2.3 Tekanan dan Beban Pada Kolom.....	23
2.4 Kekuatan Geser Kolom	25
2.5 Parameter Tanah Komposit	26
2.6 Corak Pemasangan Campuran Tanah Dalam	29
2.7 Penentuan Faktor Kasus keamanan lereng dan Tambak Dengan Metode Unsur Berhingga	30
2.8 Gap Penyelidikan.....	332
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	43
3.1 Pendahuluan	
3.2 Rekayasa dan Diagram Alir Penelitian.....	43
3.3 Penguji Lapangan	45
3.3.1 Penguji Tanah.....	46
3.3.1 Topografi Lokasi.....	46
3.4 Model Sampel Persampelan Uji Triaxial dan Uji Oedometer	46

3.5	Uji Laboratorium Mekanika Tanah	48
3.5.1	Uji Sifat-Sifat Indek Lempung Kroya	48
3.5.2	Uji Triaxial Unconsolidated Undrained	50
3.5.3	Uji Konsolidasi (<i>Konsolidasi Test</i>)	50
3.5.4	Model Sampel Kolom Kolom-Semen.....	50
3.5.5	Proses Perawatan Uji Sampel Triaxial, Geser Langsung dan Sampel Uji Konsolidasi di Laboratorium Mekanika Tanah.....	54
3.6	Tabel Uji di Laboratorium Mekanika Tanah	56
3.7	Uji Kimia, Uji Mineral dan Pengimbasan Mikrolingkup Elektron (SEM)	61
3.8	Hasil uji Laboratorium	61
3.9	Jenis dan Lokasi Laboratorium Penguji	64
BAB 4 KEPUTUSAN PENELITIAN LEMPUNG LUNAK DENGAN KANDUNGAN SEMEN		66
4.1	Pendahuluan	66
4.2	Keputusan Uji Lapangan	67
4.2.1	Penelitian Geologi Kawasan.....	68
4.2.2	Uji Galian.....	69
4.2.3	Pengerudian Teras.....	70
4.2.4	Penusukan Piawai (SPT).....	73
4.2.5	Uji Sondir.....	74
4.3	Uji Awal Di Laboratorium.....	75
4.3.1	Sifat-sifat Indeks	78
4.3.2	Sifat Fisik.....	78
4.3.3	Sifat Mekanikal Dengan Uji Triaxial UU	78
4.4 Perubahan Sifat-Sifat Indeks Lempung Lunak Akibat Penambahan Semen.....		80
4.4.1	Perubahan Batas atterberg Akibat Penambahan Semen	80
4.4.2	Perubahan Specifik gravity (Gs) Akibat Penambahan Semen.....	82
4.5	Kekuatan Geser Lempung Kroya Dengan Semen.....	83

4.5.1	Kekuatan Geser Semula Jadi Lempung Kroya	83
4.5.2	Rasio Kekuatan Geser, Kekuatan Geser dan Modulus Anjal Lempung Kroya Dengan Tambahan Variasi Semen.....	83
4.6	Unit Berat Pukal Komposit (γ_{comp}) dan Kandungan Air Komposit (w_{comp}) Pada Sampel Kolom Semen Tanah.....	87
4.6.1	Unit Berat Pukal Komposit (γ_{comp}) Pada Uji Triaxial Model Sampel Kolom Semen Tanah.....	88
4.6.2	Kandungan Air Komposit (w_{comp}) Pada Uji Triaxial Model Sampel Kolom Semen Tanah.....	90
4.7	Keputusan Penelitian Lempung Lunak Kroya Dengan Semen Sebagai Bahan Penambahbaikan.....	92
BAB 5 HASIL PENELITIAN RASIO KEKUATAN GESER MODEL SAMPEL KOLOM SEMEN TANAH.....		95
5.1	Pendahuluan	66
5.2	Rasio Kekuatan Geser Pada Model Sampel Kolom Semen Tanah	95
5.2.1	Rasio Kekuatan Geser Model Sampel Kolom Semen Tanah Melalui Triaxial Test Untuk Perawatan 7 Hari	95
5.2.2	Rasio Kekuatan Geser Model Sampel Kolom Semen Tanah Dengan Triaxial Test Masa Perawatan 28 Hari	98
5.2.3	Rasio Kekuatan Geser Model Sampel Kolom Semen Tanah Dengan Triaxial Test Masa Perawatan 56 Hari	101
5.2.4	Rasio Kekuatan Geser Model Sampel Kolom Semen Tanah Dengan Uji Geser Langsung Masa Perawatan 7 Hari.....	104
5.2.5	Rasio Kekuatan Geser Model Sampel Kolom Semen Tanah Dengan Uji Geser Langsung Masa Perawatan 28 Hari.....	106
5.2.6	Rasio Kekuatan Geser Model Sampel Kolom Semen Tanah Dengan Uji Geser Langsung Masa Perawatan 56 Hari.....	109
5.3	Pengaruh Masa Perawatan Terhadap Perubahan Rasio Kekuatan Geser Dengan Variasi Kandungan Semen	111

5.3.1 Pengaruh Masa Perawatan Terhadap Perubahan Rasio Kekuatan Geser Dari Triaxial Test	112
5.3.2 Pengaruh Masa Perawatan Terhadap Perubahan Rasio Kekuatan Geser Dari Uji Geser Langsung	114
5.4 Prosentase Perubahan Rasio Kekuatan Geser	117
5.4.1 Prosentase Perubahan Rasio Kekuatan Geser Kolom Semen Tanah Variasi Kandungan Semen Dan Masa Perawatan Dengan Triaxial Test.....	118
5.4.2 Prosentase Perubahan Rasio Kekuatan Geser Kolom Semen Tanah (SSC) Terhadap Kandungan Semen Dan Masa Perawatan Dengan Uji Geser Langsung.....	120
BAB 6 HASIL PENELITIAN FAKTOR KEKUATAN GESER KOMPOSIT MODEL KOLOM SEMEN TANAH	123
6.1 Pendahuluan	123
6.2 Kekuatan Geser Komposit Model Kolom Tanah Semen Dari Triaxial Test	123
6.2.1 Kohesi Komposit Dari Model Kolom Semen Tanah Dengan Triaxial Test.....	123
6.2.2 Prosentase Perubahan Kohesi Komposit Model Kolom Tanah Semen Dengan Triaxial Test.....	136
6.2.3 Sudut Geser Dalam Komposit Dari Model Kolom Semen Tanah Melalui Triaxial Test	137
6.2.4 Prosentase Perubahan Sudut Geser Dalam Komposit Model Kolom Tanah Semen Dengan Triaxial Test	150
6.3 Kekuatan Geser Komposit Model Kolom Tanah Semen Dari Uji Geser Langsung	152
6.3.1 Kohesi Komposit Model Kolom Tanah Semen Dari Uji Geser Langsung	152
6.3.2 Prosentase Perubahan Kohesi Komposit Model Kolom Semen Tanah Dengan Uji Geser Langsung.....	167
6.3.3 Sudut Geser Dalam Komposit Kolom Semen Tanah Dari Uji Geser Langsung Model Kolom Semen Tanah.....	169

6.3.4	Prosentase Perubahan Sudut Geser Dalam Komposit Model Kolom Semen Tanah Dengan Uji Geser Langsung	181
6.4	Modulus Elastisitas Komposit Model Kolom Semen Lempung Lembut Kroya..	182
6.4.1	Modulus Elastisitas Initial Komposit ($E_{i\ c}$)	183
6.4.2	Modulus Elastisitas Sekan Komposit ($E_{s\ comp}$).....	183
BAB 7 KORELASI PARAMETER LEMPUNG LEMBUT DENGAN PARAMETER LEMPUNG KOMPOSIT DALAM KESTABILAN PENAMBAHBAIKAN CERUN.....		194
7.1	Pendahuluan	1664
7.2	Korelasi Kekuatan Geser Komposit	194
7.2.1	Korelasi Kohesi Komposit.....	194
7.2.2	Korelasi Sudut Geser Dalam Komposit.....	196
7.3	Korelasi Modulus Elastisitas Komposit (E_{comp})	197
7.3.1	Korelasi Modulus Elastisitas Initial Komposit ($E_{i\ comp}$).....	198
7.3.2	Korelasi Modulus Elastisitas Sekan Komposit ($E_{s\ comp}$)	199
BAB 8 KESIMPULAN		197
8.1	Kesimpulan Penelitian Rasio Kekuatan Geser	201
8.2	Kesimpulan Kekuatan Geser Komposit Dan Modulus Komposit.....	203
8.3	Hasil Penelitian Korelasi Parameter Kekuatan Geser Komposit Dan Modulus Ekastisitas Komposit	207
REFERENSI		210

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Pendahuluan

Perbaikan tanah (*ground improvement*) adalah suatu rekayasa dalam geoteknik yang secara umum adalah untuk memperbaiki sifat-sifat tanah asli, sehingga dapat menyelesaikan permasalahan yang utama dalam rekayasa perencanaan seperti daya tampung atau kestabilan, penurunan dan lainnya. Perencanaan timbunan untuk keperluan badan jalan di atas tanah lunak yang cukup tebal akan menimbulkan persoalan kestabilan dan penurunan yang cukup bermasalah bila tidak dilakukan perbaikan tanah.

Perbaikan tanah telah menjadi ilmu dan seni, dengan perkembangan yang signifikan diperhatikan melalui sejarah purba. Dari penggunaan jerami sebagai pengisi campuran dengan tanah untuk kekuatan tambahan selama peradaban Roma kuno, dan penggunaan gajah untuk pemadatan bendungan selama peradaban Asia awal, konsep perkuatan tanah dengan geosintetik, penggunaan elektrokinetik dan modifikasi termal tanah telah berkembang pesat. Penggunaan kolom batu besar dan kaku dan saluran pasir berikutnya pada masa lalu kini telah diganti dengan saluran vertikal prefabrikasi yang lebih cepat dipasang dan lebih efektif, yang juga telah menghilangkan keperluan akan metode perbaikan tanah yang lebih mahal (Buddhima, 2005).

1.2 Latar Belakang Penelitian

Julur keretapi *double track* antara Purwokerto-Kroya sepanjang sekitar 27 kilometer mulai dilaksanakan pembangunannya secara sebagian dan bertahap oleh

Unit Kerja *Double Track* Cirebon-Kroya, Direktorat Jenderal Keretapi Kementerian Perhubungan. Timbunan badan jalan rel double track dari KM 349+954 di Purwokerto hingga KM 377+122 di Kroya tersebut mulai dikerjakan sejak Desember 2015 (Bauer Pratama Indonesia, 2016). Timbunan badan jalan rel yang baru dibuat di sisi jalur KA sedia ada dan diketahui berada di jalur tanah lunak. Pekerjaan ini meliputi penggalian, pengurangan, pemadatan tanah, dan perbaikan atau perkuatan tanah. Lokasi pekerjaan dapat dilihat di dalam Gambar 1.1.



Gambar 1-1 Lokasi Pekerjaan Pembuatan Timbunan Badan Jalan Rel Jalur KA Antara Purwokerto Dan Kroya (Promisco, 2016)

Keadaan lapisan tanah dasar lapangan double track tersebut merupakan lapisan lempung lunak yang memiliki kekuatan geser yang rendah dan kompresibilitas tanah yang tinggi. Dari titik-titik penyelidikan tanah yang dilakukan pada lapangan double track seperti di dalam Gambar 1.2 didapati hasil *Standard Penetration Test* (N-SPT) seperti pada Tabel 1.1, dan lapisan stratigrafi pada lapangan dapat dilihat pada Gambar 1.3.

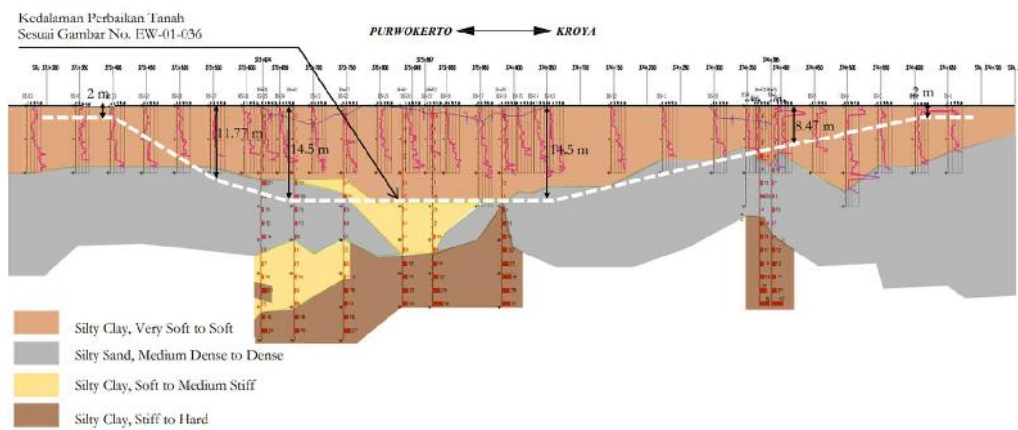
Tabel 1-1 Hasil N-SPT pada 8 titik bor dalam (Bauer Pratama Indonesia, 2016)

Kedalaman	N - SPT							
	BH-01	BH-02	BH-03	BH-04	BH-05	BH-06	BH-07	BH-08
1.55	2	2	6	2	2	2	2	6
3.55	1	1	1	1	1	1	1	1
5.55	1	2	1	1	1	1	2	1
7.55	1	14	1	2	1	1	1	1
9.55	11	4	1	1	1	1	1	1
11.55	7	12	1	4	14	21	4	1
13.55	9	20	4	1	19	8	11	4
15.55	12	4	3	4	13	10	9	3
17.55	5	14	2	4	13	12	8	2
19.55	5	12	10	4	9	16	5	10
21.55	12	11	9	9	4	5	3	9
23.55	13	14	14	18	5	7	8	14
25.55	17	15	22	19	10	10	7	22

27.55	21	28	29	22	6	21	19	29
29.55	42	39	39	20	9	5	15	38
31.55					18	15	18	
33.55					19	24	27	

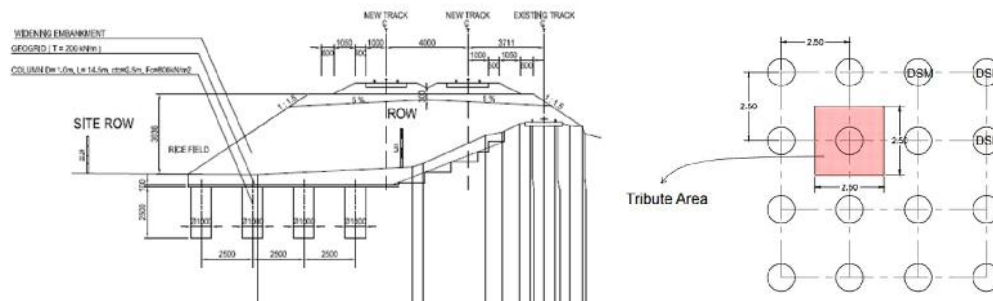


Gambar 1-2 Lokasi penyelidikan tanah double track Kroya-Purwokerto (Bauer Pratama Indonesia, 2016)



Gambar 1-3 Stratigrafi tanah KM 373+300 – KM 373+750 (Bauer Pratama Indonesia, 2016)

Pada kasus di atas, telah dilakukan perencanaan dan pelaksanaan perbaikan tanah dengan metode *rigid inclusion* yaitu menggunakan *Deep Soil Mixing* dengan tambahan *bahan portland semen*, sehingga akhirnya menjadi *Soil-Semen Column* (SCC). Rekayasa dan pelaksanaan SCC pada kasus ini seperti pada Gambar 1.4 berikut. Diameter SCC sebesar 1.00 m digunakan, dengan *layout square patern* dengan jarak antara SCC adalah 2.5 m dengan kedalaman seperti pada Gambar 1.3.



Gambar 1-4 Rekayasa dan pelaksanaan perbaikan tanah dengan kolom semen tanah (SCC) pada kasus double track Purwokerto – Kroya (Promisco, 2016)

1.3 Pernyataan Masalah

Permasalahan tanah lunak seperti pada gambar dan tabel di atas dapat menggambarkan latar belakang permasalahan penelitian ini. Pemilihan SCC dalam kasus tersebut, memiliki beberapa variasi rekayasa yang dapat dipilih, seperti diameter SCC, kedalaman SCC, jarak antara SCC, kandungan semen pada SCC. Analisis kestabilan timbungan badan jalan *double track* memerlukan sifat-sifat bahan meliputi parameter tanah seperti indeksnya, mekanikal, sifat kompresibilitas dan sifat bahan dari SCC.

Sebelum ini pada umumnya perencanaan kestabilan analisis dilakukan dengan perisian Plaxis. Dengan memodelkan beban timbunan pada tanah asli (*soft clay*) dan SCC sebagai dua bahan yang terpisah, dibuat berdasarkan uji laboratorium mekanika tanah yang piawai. Analisis kestabilan dilaksanakan dengan menganggap tanah lunak dan SCC, merupakan bahan yang homogen (*composite*) dengan memakai kekuatan geser komposit yang didapati dari kekuatan geser lempung lunak dan kekuatan geser bahan SCC (Priebe, 1995).

Analisis perencanaan perbaikan tanah dalam pada lempung lunak maupun pasir lepas dengan menggunakan metode *rigid inclusion* sering kali menggunakan penelitian Priebe (1955). Pada penelitian tersebut dua sifat tanah yang berbeza seperti kekuatan geser dan keanjalan, dimodelkan sebagai bahan yang homogen, sehingga dipakai rumusan sifat kompositnya yang terdiri dari kedua sifat yang berbeza tersebut. Pemakaian parameter homogen tersebut sampai saat ini masih layak digunakan dalam penyelesaian perencanaan perbaikan tanah dalam. Namun pemakaian model SCC dalam menentukan parameter komposit antara tanah lunak dan kolom semen tanah akan disyorkan. Dengan menggunakan model SCC, akan dipakai parameter homogen yang diperolehi dari uji laboratorium model SCC. Dalam model SCC dapat dibuat variasi faktor air semen, jumlah pemakaian semen, serta rasio antara diameter kolom semen tanah dengan jarak antara kolom semen tanah. Sehingga dengan memakai model SCC dalam rekayasa, akan diperolehi hasil rekayasa yang lebih efisien dengan memenuhi kriteria piawai rekayasa geoteknik.

1.4 Tujuan dan Objektif Penelitian

Penelitian ini dijalankan dengan tujuan untuk mengkaji parameterer kekuatan geser dan kompressibilitas komposit dari *soft clay* dan SCC dari uji di laboratorium. Tujuan penelitian dicapai melalui lima objektif berikut:

- (1) Menentukan pengaruh diameter SCC, jarak antara SCC, kandungan semen pada SCC dan jisim SCC terhadap kekuatan geser komposit *clay* dan SCC.

- (2) Menentukan perubahan rasio kekuatan geser pada tegasan puncak komposit lempung dan SCC akibat proses pemeraman (*perawatan*) di laboratorium.
- (3) Membangunkan metode uji kekuatan geser dengan model sampel SCC dalam keperluan kestabilan cerun badan trek rel keretapi dengan metode perbaikan dengan SCC.
- (4) Menilai metode yang pasti dalam penggunaan kekuatan geser bagi permasalahan kestabilan cerun timbunan trek rel keretapi di tanah lempung lunak yang diperbaiki dengan SCC pada masa hadapan.
- (5) Mengesyorkan metode uji kekuatan geser yang sesuai bagi keperluan perencanaan rekayasa kestabilan cerun badan trek rel keretapi dengan perbaikan lempung lunak menggunakan SCC yang mempunyai binaan infrastruktur.

1.5 Lingkup Penelitian

Lingkup penelitian ini akan dilakukan pada kasus pembangunan trek rel keretapi berganda di antara Kroya dan Purwokerto, Jawa Tengah, Indonesia seperti pada Gambar 1.1. Projek tersebut sudah selesai rekayasa dan pelaksanaannya pada tahun 2018 yang lalu. Untuk penelitian ini sampel tanah lempung lempung lunak dari satu lokasi tersebut diambil untuk dilakukan uji lanjut di laboratorium mekanika tanah. Dari penelitian uji kekuatan geser di laboratorium dengan sampelnya memodelkan SCC, maka penyelesaian masalah perincian rekayasa pada kasus tersebut diharapkan dapat memberi rekayasa alternatif dengan SCC yang menggunakan hasil kekuatan geser di laboratorium. Analisis yang diguna dihadkan kepada metode unsur terhingga (*finite element method*) dan menggunakan perisian *Plaxis V.7*.

Untuk mencapai objektif (1), perubahan parameter sifat-sifat kekuatan geser akibat variasi diameter SSC, jarak antara SCC dan kualiti campuran SCC dilakukan dengan uji triaxial tak tepu (*unsaturated triaxial test*). Uji sampel lempung lunak diubahsuai dengan memasukkan campuran (inklusi) *soil-semen* dengan diameter yang

dipelbagaikan dan campuran semen pada *soil-semen* yang dipelbagaikan juga. Kejelekitan (c) dan sudut gelongsoran dalam (ϕ) diperolehi dari setiap variasi SCC.

Kemudian, dalam objektif (2) uji sifat-sifat kekuatan tersebut dilakukan dengan pemerhatian pada setiap sela masa tertentu untuk mengetahui proses sementasi campuran *soil-semen*, dan rasio kuat geser diperolehi dari setiap variasi SCC. Pada sela masa tersebut dari proses perawatan sampel SCC rasio kuat geser diperolehi juga dari setiap variasi SCC. Rasio kuat geser diperolehi dari tegasan utama dibahagikan dengan tegasan keliling pada uji triaxial tak terkukuh tak tersalir. Semasa proses perawatan sampel SCC dijalankan uji triaxial tak terkukuh tak bersalir (*Triaxial UU Test*) dilakukan dalam keadaan sampel tanah tak tepu.

Kemudian dalam objektif (3), analisis kestabilan cerun pada timbunan badan trek rel keretapi dengan perbaikan menggunakan SCC, tanah lempung lunak dan SCC dibuat suatu bahan komposit (homogen) dengan sifat mekanika (parameter kuat geser) dari hasil uji triaxial dengan model sampel SCC. Pada bagian ini semua hasil uji triaxial dengan bermacam variasi dipakai sebagai input dalam analisis kestabilan melalui program Plaxis.

Manakala untuk objektif (4), parameter kekuatan geser komposit SCC dari uji laboratorium hasil rekayasa SCCnya akan dibandingkan dengan hasil rekayasa berdasarkan parameter kekuatan geser yang berlaku pada lokasi cerun pada badan trek keretapi berganda di Kroya-Purwokerto ketika perencanaan dilakukan oleh Promisco Berhad Bandung sebagai jurutera rekayasa. Akhirnya, melalui objektif (5) cara mendapatkan parameter kekuatan geser dari model sampel SCC yang lebih tepat akan ditentukan untuk tujuan perencanaan konsolidasi kestabilan cerun pada rancangan tambakan benteng di atas lempung lunak dengan menggunakan SCC.

1.6 Kepentingan Penelitian

Penelitian berkaitan kelakuan dan prestasi SCC sebagai salah satu pilihan penyelesaian perbaikan tanah di lempung lunak, telah banyak dikaji dari penyelidik yang lalu (Alatas I. M, 1991; Priebe, 1995, S. Pongsivasathit, 2017). Penguji kolom lempung semen dan kolom lempung kapur di laboratorium dengan uji tiga terkukuh tak tersalir pada lempung Losari Jawa Tengah adalah penelitian awal di Indonesia untuk trek keretapi di Lokasi Jawa Tengah (Alatas I. M, 1991). Penelitian lanjut perincian daya tampung pada persoalan kolom batu dengan melihat variasi diameter dan jarak serta sudut gelongsoran dalam bahan batu dilihat semakin berkembang (Priebe, 1995). Pada kasus trek keretapi berganda Kroya-Purwokerto, pemakaian SCC diameter 1.00 m sedalam kira-kira 14.00 m, dengan jarak SCC 2.50 m serta rasio semennya 200 kg/m^3 telah dilaksanakan pada tahun 2016 yang lalu (Bauer, 2016). Penelitian terkini perihal SCC terhadap kestabilan tambak yang dibina di atas tanah lunak dirawat dengan kolom tanah–semen (Prakash, 2022). Sedangkan penelitian penilaian sifat fisik dan mekanikal telah dilakukan pada ujiam skala penuh SCC (Mustafa Fahmi Hasan, 2022)

Daripada perkembangan tersebut, didapati penelitian laboratorium masa kini belum ada yang membuat penelitian serta penilaian tentang pemakaian parameter komposit lempung lunak dan SCC dari uji triaxial uncolidated undrained dalam keadaan tak tepu sebagai parameter kuat geser dalam analisis kestabilan tambak benteng di atas lempung lunak dengan perkuatan menggunakan kolom tanah-semen dengan perisian *Plaxis*. Pada akhir penelitian ini, cadangan metode uji laboratorium pada tanah lempung lunak yang mengambil kira aspek perbaikan dengan SCC dapat disediakan untuk kasus-kasus perbaikan lempung lunak di mana-mana tempat. Malahan parameter kekuatan geser model SCC dengan uji triaxial terkukuh tak tersalir dan uji geser langsung berdasarkan hasil uji laboratorium yang lengkap juga dapat disarankan untuk perencanaan tambak benteng di tanah lempung lunak dengan SCC di mana-mana Indonesia. Ini seterusnya dapat digunakan dalam penelitian mengatasi masalah tanah lunak pada masa hadapan di Indonesia.

1.7 Pengaturan Penelitian

Bab 1 adalah pendahuluan yang meliputi perbincangan tentang latar belakang, pernyataan masalah, tujuan dan objektif penelitian, lingkup penelitian dan kepentingan penelitian.

Seterusnya, Bab 2 membincangkan penelitian literatur berkaitan lempung lunak, ciri-ciri kekuatan geser serta pengaruh SCC terhadap peningkatan kekuatan geser kompositnya. Analisis kestabilan cerun dengan SCC dua dimensi turut dibincangkan dalam bab ini.

Dalam Bab 3, metodologi penelitian dibincangkan dengan memuatkan diagram alir penelitian dan penjelasan tentang metode uji laboratorium yang akan dilakukan. Manakala hasil awal uji lapangan, uji laboratorium mekanika tanah.

Dalam Bab 4, hasil uji sifat-sifat indeks, fisik, mekanikal lempung lunak dibincangkan. Pada Bab 4 pula, perbincangan hasil kekuatan geser dari lempung lunak dengan SCC sebagai bahan komposit (homogen) terhadap proses perawatan yang dilakukan hingga masa 7, 28 dan 56 hari. Kekuatan geser dan sampel model SCC yang dihasilkan ialah pada keadaan tegasan puncak dan pada keadaan lempung tak tepu dengan uji triaxial dan uji geser langsung.

Kemudian Bab 5, membincangkan rekayasa SCC yang dihasilkan dengan kaitan antara beberapa parameter komposit dengan bermacam variasi, pengaruh rasio tegasan geser terhadap perubahan kekuatan geser model SCC juga turut dibincangkan. Analisis di atas dibandingkan dengan analisis yang telah dilakukan oleh jurutera (Promisco, 2016) yang dilakukan dengan pendekatan 2 bahan lempung lunak dan SCC serta analisis kestabilan menggunakan program Plaxis. Parameter kekuatan geser komposit dalam perencanaan kestabilan cerun di atas lempung lunak dan SCC juga

dicadangkan dalam Bab ini. Penelitian ini diakhiri dengan Bab 6 untuk kesimpulan dan cadangan penelitian lanjut.

BAB 2

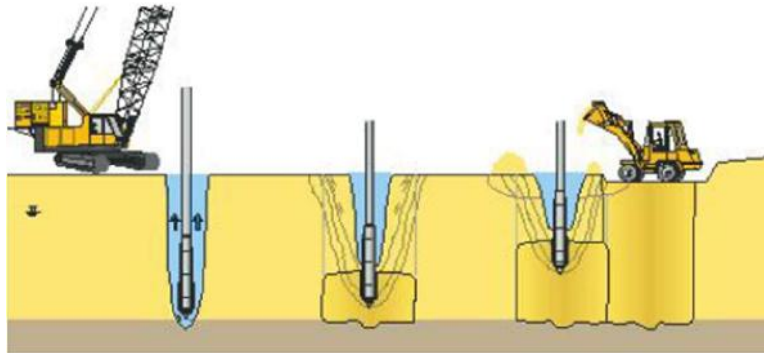
PENELITIAN LITERATUR

2.1 Pendahuluan

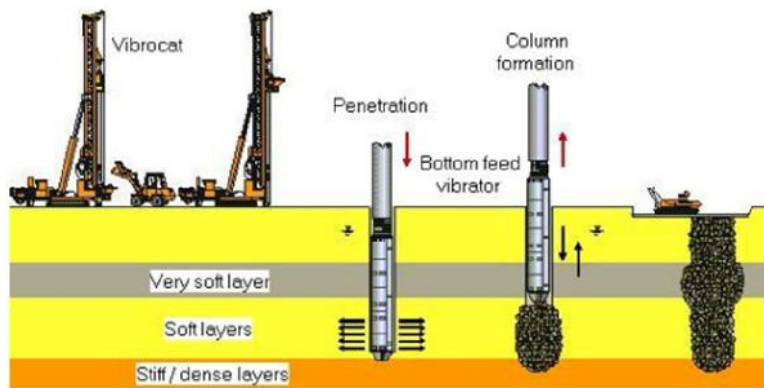
Infrastruktur keretapi moden menuntut tahap prestasi yang tinggi dari segi penempatan dan kestabilan subgrade keretapi. Di kawasan di mana terdapat pasir longgar atau lempung lunak dengan kejelekitan yang kecil, penambahbaikan tanah (ground improvement) selalunya diperlukan untuk memastikan tahap prestasi yang diperlukan. Teknik-teknik penambahbaikan tanah yang berlaku pada subgrade keretapi dipersembahkan ialah pemadatan getar (*Vibro Compaction*) seperti pada Gambar 2.1, penggantian vibro (*Vibro Replasemen*) atau kolom batu (*Stone Columns*) seperti pada Gambar 2.2, kolom batu beralur (*Grouted Stone Column*) seperti pada Gambar 2.3, kolom konkrit getaran (*Vibro Concrete Column*) dan pencampuran tanah dalam (*Deep Soil Mixing*) atau kolom tanah-semen (Raju, 2015).

Pada bab ini disampaikan penelitian literatur dari beberapa penyelidik terdahulu yang mengaitkan perilaku dan kekuatan geser lempung lunak diperbaiki dengan pencampuran tanah dalam (*deep soil mixing*), dengan variasi diameter tiang inklusi (*rigid inclusion*) berupa kolom tanah-semen (SCC) dan jarak antara SCC pada suatu kedalaman, terhadap peningkatan kestabilan kapasiti galas (*bearing capacity*). Beberapa penelitian pencampuran tanah dalam, berupa SCC yang lalu telah membincangkan hasil berbagai jenis uji di laboratorium dan di lapangan mahupun penelitian secara numerikal dengan bantuan perisian, telah dikaji beberapa permasalahan kelakuan fisik, mekanikal dan kelakuan istimewa lainnya terutama pada tanah lunak (Mustafa Fahmi Hasan, 2022; Natalia Zuievskaya, 2021; Nguyen Thai Linh, 2020; Pham Van Ngoc, 2017; Prakash, K. G., 2022). Penelitian mengenai

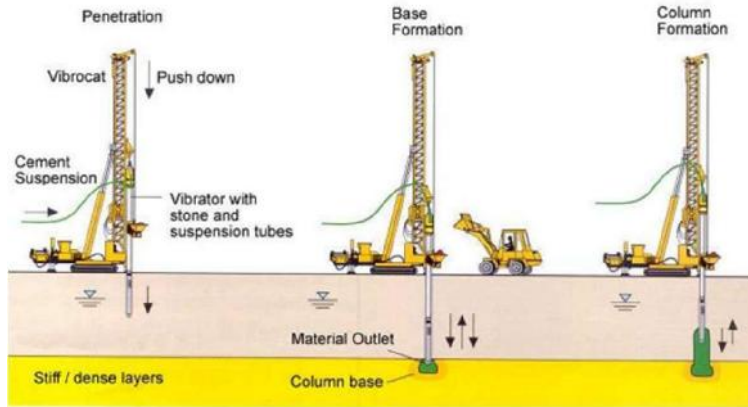
kelakuan SCC dalam menerima beban tersebut sangat penting dalam perbincangan dan pengesahan hasil penelitian uji yang diperoleh.



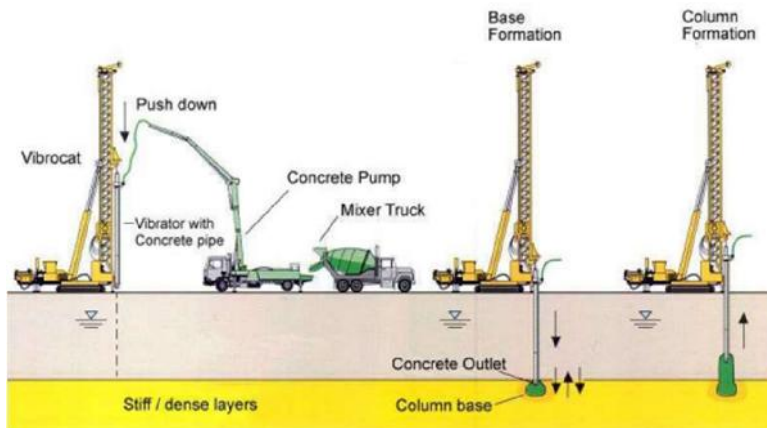
Gambar 2-1 Skema yang menunjukkan pemadatan getar (Raju, 2015)



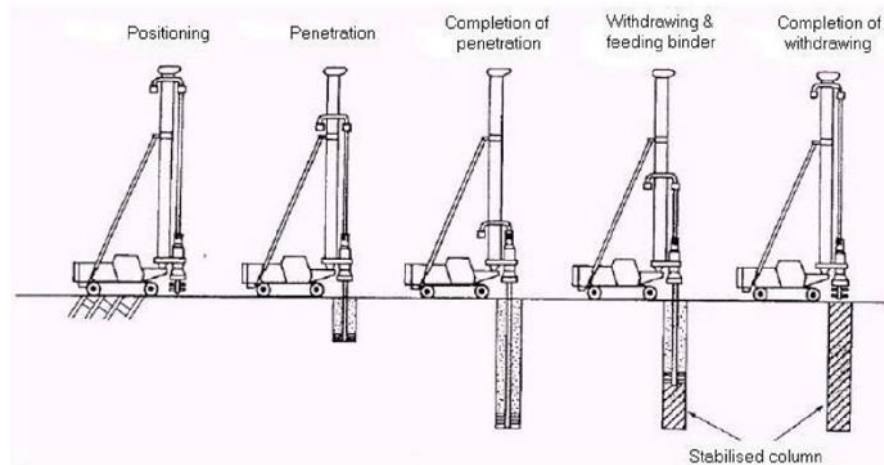
Gambar 2-2 Skema yang menunjukkan pemasangan kolom batu metode kering (Raju, 2015)



Gambar 2-3 Skema yang menunjukkan pemasangan kolom batu beralur (Raju, 2015)



Gambar 2-4 Skema yang menunjukkan pemasangan kolom konkrit getar (Raju, 2015)



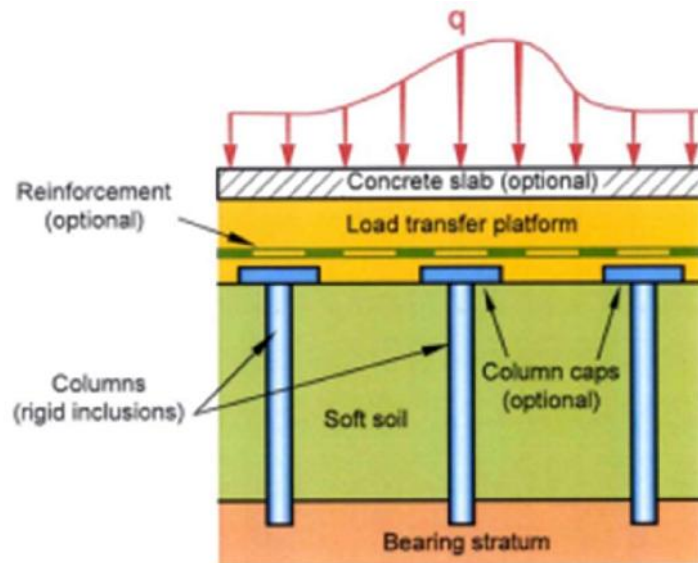
Gambar 2-5 Skema yang menunjukkan pelaksanaan pencampuran tanah dalam kering (Raju, 2015)

2.2 Tiang inklusi (*Rigid Inclusion*)

2.2.1 Konsep Tiang inklusi

Teknik ini, yang menyaksikan peningkatan penggunaan di banyak negara, mempunyai banyak nama yang berbeza: tambak bertimbun (*piled-embankment*), tambak disokong kolom (*column-supported embankment*), tambak disokong cerucuk bertetulang geosintetik (*geosynthetic reinforced pile supported GRPS*), tambak disokong cerucuk pelantar bumi (*pile-supported earth platform*) atau tetulang kolom tanah (*soil column reinforcement*). Tiang inklusi juga dipanggil kolom, kemasukan seperti cerucuk atau cerucuk penurunan penyelesaian bukan sentuhan (*non-contact settlement-reducing piles*) dalam pengertian generik, kolom campuran dalam (*Column Deep Mixing*), kolom kapur (*Lime Column*) atau kolom grouting jet (*Jet Grouting Column*) merujuk kepada beberapa teknik pemasangan yang biasa digunakan; dan kolom modulus terkawal (*Controlled Modulus Columns, CMC*) atau kolom konkrit getar (*Vibro Concrete Columns, VCC*) merujuk kepada nama hak milik (Simon, 2012).

Konsep umum teknik ini ialah gabungan susunan kolom tegar menegak dan berbutir tiam (lapisan pemindahan beban) supaya beban dari tambak atau papak dipindahkan ke lapisan gelas dalam (Gambar 2.6). Kolom mungkin mempunyai kepala atau penutup yang diperbesarkan.

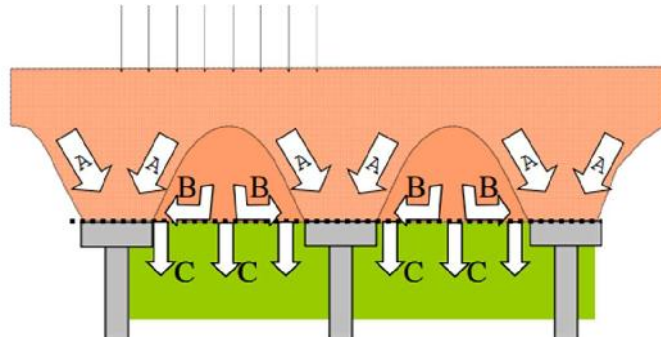


Gambar 2-6 Konstituen konsep penambahbaikan tanah tiang inklusi (Simon, 2012).

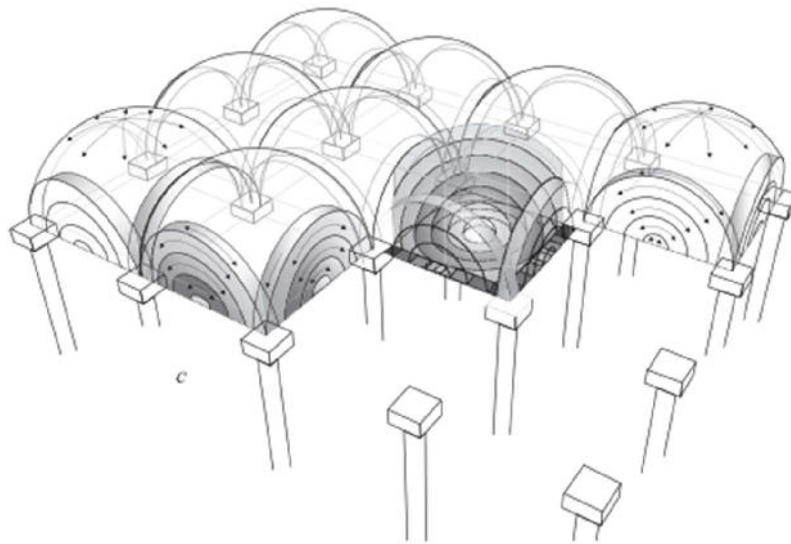
2.2.2 Pindah Beban ke Kepala Kemasukan

Van Eckelen dan Bezuijen (2015) membentangkan penelitian lapangan dan skala kecil tentang peranan tetulang geosintetik pada asas tambak bertimbun berdasarkan peraturan rekayasa terkini yang dikeluarkan oleh Belanda, Jerman atau Great Britain (Simon, 2012). Kertas mereka, yang memfokuskan pada pemuatan menegak, menilai bagaimana beban pengisi boleh dibahagikan kepada sebagian "A", yang dibawa terus ke kepala cerucuk melalui geser (atau melengkung) dalam isian,

dan bagian "B+C", di mana bagian "B" juga boleh dipindahkan melalui tetulang geosintetik (GR) ke cerucuk, manakala baki bagian "C" boleh dibawa oleh tanah bawah (Gambar 2.7)



Gambar 2-7 Pengagihan beban dalam tambak bertimbun (Van Eekelen 2015).



Gambar 2-8 Model *concentric arches* (CA), (Van Eekelen 2015).

2.3 Tekanan dan Beban Pada Kolom

Tegasan kegagalan yang boleh dikekalkan oleh kolom,

$$\sigma_{f \text{ col}} = 2 c_{u \text{ col}} + 3 (\sigma_h + 5 c_{u \text{ soil}}) \quad (1)$$

di mana $c_{u\ col}$ & c_u ialah jelekit tak tersalir bagi kolom dan tanah lapangan masing-masing dan σ_h ialah tegasan mendatar dikira pada bagian atas lapisan lempung lunak lunak menggunakan $K = 1$ dan 50% dari pada beban tambak.

Tegasan rayapan kolom biasanya dikira sebagai,

$$\sigma_{\text{creep col}} = m_C \times \sigma_{f\ \text{col}} \quad (2)$$

Modulus Young bagi kolom boleh dianggarkan sebagai,

$$E_{\text{col}} = m_E \times \sigma_{\text{creep col}} \quad (3)$$

di mana m_C dan m_E adalah pemalar dan nilainya bergantung pada jenis tanah lapangan seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 2.1.

Tabel 2-1 Nilai pemalar m_C dan m_E (Raju, 2010)

Huraian Tanah	m_C	m_E
Clayey silt	0.8 – 0.9	150 – 200
Silty clay	0.8	150 – 200
Clay	0.7 – 0.8	150
Organic clay	0.6 – 0.7	100
Peat	0.6	50 – 75
Silty, clayey sand	0.9	200 - 250

Untuk memastikan bahwa penyelesaian yang terhasil di tanah yang dirawat adalah kurang daripada 0.5% daripada kedalaman yang dirawat, adalah amalan umum

untuk menghadkan tegasan yang dibenarkan pada kolom kepada 70% (nilai yang lebih tinggi boleh digunakan bergantung kepada keadaan tanah) tegasan rayapan.

$$\sigma_{\text{all col}} = 0.7 \sigma_{\text{creep col}} \quad (4)$$

Beban yang dibenarkan pada kolom boleh dikira sebagai,

$$P_{\text{all col}} = \sigma_{\text{all col}} \times A_{\text{col}} \quad (5)$$

Jarak kolom dalam corak grid segi empat sama boleh dinilai sebagai,

$$s = \left(\frac{P_{\text{all col}}}{\sigma_{\text{imp}}} \right)^{0.5} \quad (6)$$

di mana σ_{imp} ialah tegasan yang dikenakan bagi pihak beban mati dan beban hidup di atas tanah permukaan.

2.4 Kekuatan Geser Kolom

Persamaan yang mengawal kekuatan geser ialah persamaan Mohr-Coulomb seperti yang ditunjukkan di bawah,

$$\tau = c + \sigma_{\text{vert}} \tan \phi \quad (7)$$

Kekuatan geser tak tersalir kolom diandaikan sebagai jelekit tak tersalir kolom,

$$\tau_{\text{u col}} = c_{\text{u col}} \quad (8)$$

di mana, $c_{\text{u col}}$ diandaikan sebagai 100 - 250 kPa bergantung kepada ciri-ciri pengikat dan tanah lapangan.

Kekuatan geser tersalir kolom dikira seperti berikut,

$$\tau_{\text{d col}} = c_{\text{d col}} + \sigma_{\text{vert}} \tan \phi_{(\text{d col})} \quad (9)$$

di mana, $c_{d\ col}$ diandaikan sebagai 30% daripada $c_{u\ col}$ dan $\phi_{d\ col}$ diandaikan sebagai 40° hingga 45° .

2.5 Parameter Tanah Komposit

Tanah di dalam blok yang distabilkan akan dianggap sebagai matriks tanah komposit dengan parameter tanah yang baru seperti dalam Gambar 2.9. Modulus Young dan jelekit tak tersalir tanah komposit (c_u) dianggarkan seperti berikut.

$$E_{comp} = a \times E_{col} + (1 - a) \times E_{soil} \quad (10)$$

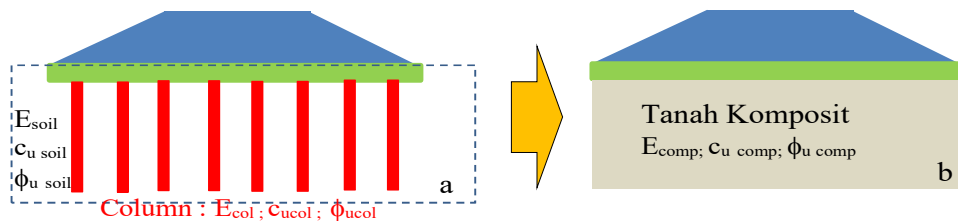
$$c_{u\ comp} = a \times c_{u\ col} + (1 - a) \times c_{u\ soil} \quad (11)$$

$$c_{d\ comp} = a \times c_{d\ col} + (1 - a) \times c_{d\ soil} \quad (12)$$

$$\phi_{u\ comp} = \tan^{-1}[a \times \tan(\phi_{u\ col}) + (1 - a) \times \tan(\phi_{u\ soil})] \quad (13)$$

$$\phi_{d\ comp} = \tan^{-1}[a \times \tan(\phi_{d\ col}) + (1 - a) \times \tan(\phi_{d\ soil})] \quad (14)$$

di mana E_{col} , E_{soil} dan E_{comp} ialah modulus Young kolom, tanah dan komposit; $c_{u\ col}$, $c_{u\ soil}$ dan $c_{u\ comp}$ ialah jelekit yang tak tersalir dari kolom, tanah dan komposit; $c_{d\ col}$, $c_{d\ soil}$ dan $c_{d\ comp}$ ialah jelekit tersalir dari kolom, tanah dan komposit; $\phi_{u\ col}$, $\phi_{u\ soil}$ dan $\phi_{u\ comp}$ ialah sudut gelongsoran dalam tak tersalir dari kolom, tanah dan komposit; $\phi_{d\ col}$, $\phi_{d\ soil}$ dan $\phi_{d\ comp}$ masing-masing ialah sudut gelongsoran dalam tersalir kolom, tanah dan komposit. Dan 'a' ialah rasio gantian kawasan yang dikira sebagai, $a = (A_{col} / s^2)$ untuk corak grid segi empat sama jarak 's'. Dalam pengiraan boleh diandaikan bahwa penempatan akan sama di dalam tanah dan dalam kolom yang stabil untuk memastikan kasuserasian (Raju, 2010).



Gambar 2-9 Menggunakan sifat tanah dan sifat kolom (a) Menggunakan sifat Komposit Tanah (b)

Pada kolom batu yang menerima bagian yang meningkat dari jumlah beban m sehingga tergantung pada rasio luas A_{col}/A dan faktor peningkatan n , di mana hubungan m dan n dapat dilihat pada persamaan berikut (Priebe, 1995)

$$m = (n - 1 + A_{col}/A) / n \quad (15)$$

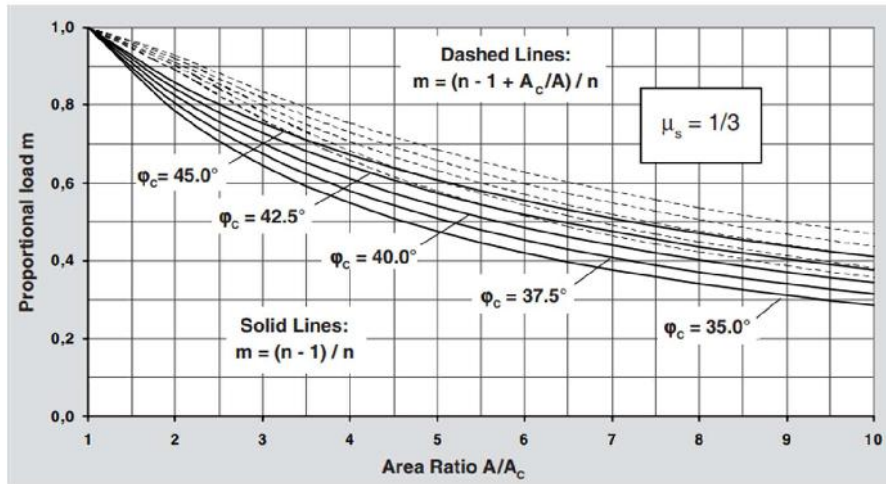
Menyederhanakan, prosedur rekayasa yang disarankan tidak mempertimbangkan penurunan isipadu tanah di sekitarnya yang disebabkan oleh penonjolan kolom. Oleh karena itu dan khususnya pada rasio luas yang tinggi, tanah menerima bagian beban jumlah yang lebih besar daripada yang sebenarnya dihitung. Agar tidak menaksir tahanan gelongsor kolom secara berlebihan ketika berdasarkan agihan beban pada kolom dan tanah, beban berkadar pada kolom harus dikurangkan (Priebe, 1995), seperti pada persamaan berikut.

$$m = (n - 1) / n \quad (16)$$

Dalam Gambar 2.10 menunjukkan dalam garisan pepejal beban berkadar kolom m' dan dalam garis putus-putus satu m tidak berkurang.

Mengikuti beban berkadar pada kolom dan tanah, rintangan geser daripada gelongsoran sistem komposit boleh dirata-ratakan dengan mudah.

$$\tan \phi_{comp} = m' \tan \phi_{col} + (1 - m') \tan \phi_{soil} \quad (17)$$



Gambar 2-10 Beban berkadar pada kolom batu (Heinz J. Priebe, 1995)

Oleh karena dalam kebanyakan kasus praktikal kemungkinan garisan gelongsor meliputi kedalaman yang berbeza yang sukar untuk ditinjau, adalah disyorkan untuk mempertimbangkan faktor kedalaman dalam kasus yang jelas sahaja, yaitu untuk mengira biasanya dengan bagian beban kolom batu m_1' berkaitan dengan n_1' dan bukan dengan m_2' berkaitan dengan peningkatan faktor $n_2 = f_d \cdot n_1$. Sistem komposit bergantung pada keluasan berkadar tanah (Heinz J. Priebe, 1995).

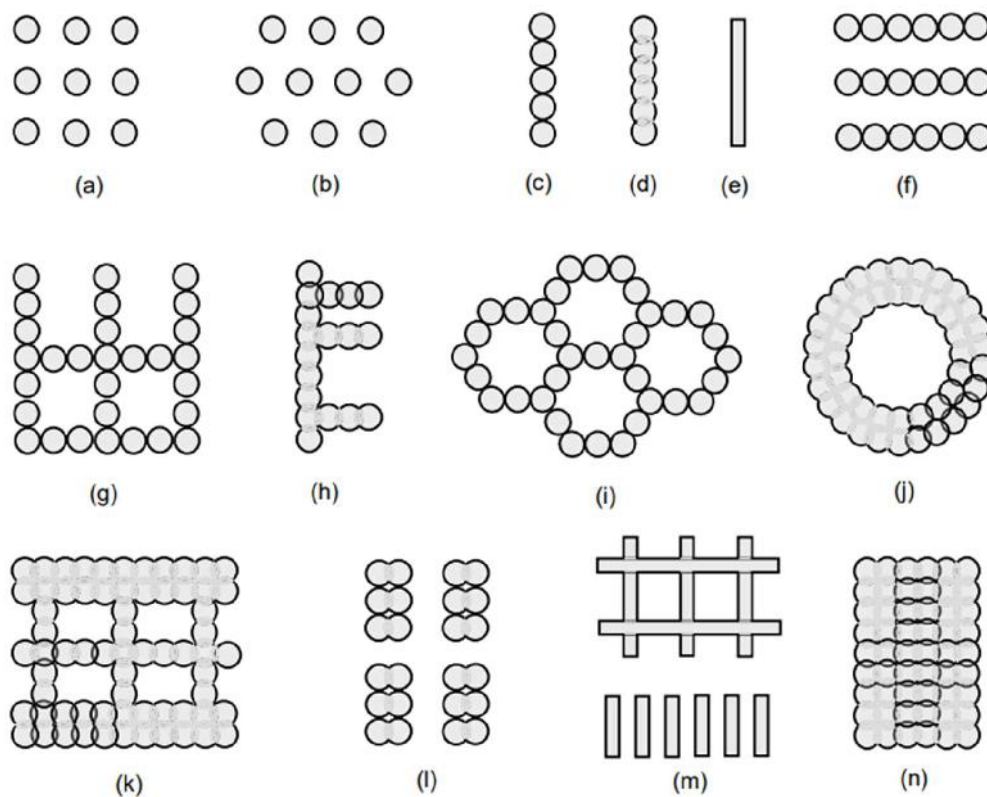
$$c_{\text{comp}} = (1 - A_{\text{col}}/A) c_{\text{soil}} \quad (18)$$

Pemasangan kolom batu mungkin menyebabkan kerosakan pada struktur tanah yang sukar untuk diukur. Atas sebab kasuselamatan, nampaknya dinasihatkan untuk mempertimbangkan perpaduan juga berkadar dengan beban, i. e. agak rendah, walaupun cadangan ini tidak berdasarkan aspek mekanikal tanah (Heinz J. Priebe, 1995).

$$c_{\text{comp}}' = (1 - m') c_{\text{soil}} \quad (19)$$

2.6 Corak Pemasangan Campuran Tanah Dalam

Pencampuran tanah boleh dilakukan dengan rasio penggantian 100% di mana semua tanah di dalam blok tertentu dirawat, seperti yang biasa berlaku untuk aplikasi pencampuran jisim, atau kepada rasio yang lebih rendah yang dipilih, yang sering diamalkan dengan pencampuran dalam. Rasio yang dipilih mencerminkan keupayaan mekanikal dan ciri-ciri metode yang digunakan. Bergantung pada tujuan kerja-kerja mencampur dalam, keadaan khusus lapangan, rekayasa dan kos rawatan, corak pemasangan kolom yang berbeza digunakan untuk mencapai hasil yang diinginkan dengan menggunakan kolom jarak atau bertindih dan tunggal atau gabungan. Corak biasa ditunjukkan dalam Gambar 2.11 (Michalowski, 2018).



Gambar 2-11 Contoh corak pencampuran tanah dalam: (a), (b) column-type (square and triangular arrangement), (c) tangent wall, (d) overlapped wall, (e) trench/CSM

wall, (f) tangent walls, (g) tangent grid, (h) overlapped wall with buttresses, (i) tangent cells, (j) ring, (k) lattice, (l) group columns, (m) multiple trenches/CSM walls, (n) block (Michalowski, 2018).

Corak grid segi empat sama atau segi tiga bagi kolom tunggal atau gabungan biasanya digunakan apabila tujuan campuan tanah dalam (DSM) ialah pengurangan penyelesaian dan, dalam beberapa kasus, peningkatan kestabilan. Contoh biasa ialah tambak jalan dan keretapi. Dinding digunakan untuk kawalan penggalian, untuk menstabilkan potongan terbuka dan melindungi struktur dengan asas cetek mengelilingi penggalian, dan sebagai langkah menentang resapan. Ia juga dibina untuk meningkatkan kapasiti gelas tanah yang lebih baik terhadap daya mendatar atau gelongsor, dengan baris kolom dipasang ke arah pembebanan mendatar atau berserenjang dengan permukaan kegagalan yang dijangkakan. Dinding boleh dibina dengan kolom tangen atau bertindih, panel sambungan atau sebagai struktur parit. Pertindihan amat penting apabila melaksanakan dinding potong atau halangan persekitaran (Michalowski, 2018).

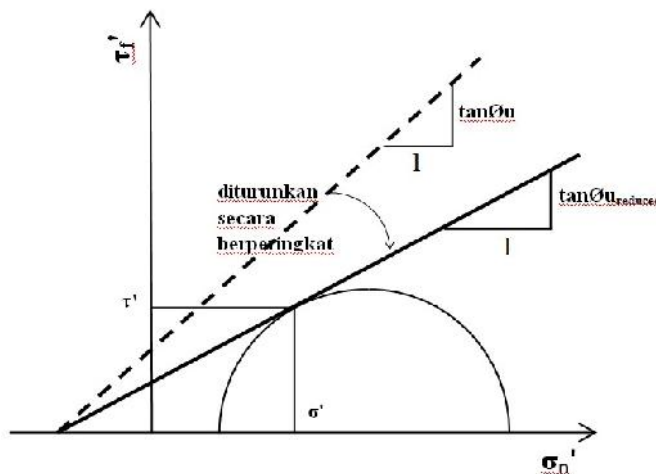
2.7 Penentuan Faktor Kasuselamatan Cerun dan Tambak Dengan Metode Unsur Berhingga

Jika metode unsur terhingga (FEM) digunakan dalam analisis kestabilan cerun di atas tambak, tiada anggapan satah kegagalan dibuat terlebih dahulu. Faktor kasuselamatan cerun (FK) dihitung dengan mencari satah lemah pada struktur lapisan tanah pada cerun dan tambak. Faktor kasuselamatan diperoleh dengan cara mengurangkan nilai jelekitan (c) dan sudut gelongsoran dalam (ϕ) yang terkenal dengan istilah *C-Phi Reduction* (Cheang, 2013; Plaxis, 2004). Kemudian secara berperingkat hingga tanah mengalami kegagalan, nilai faktor kasuselamatan (FK) dihitung dengan persamaan (20)

$$\sum FK = \frac{c}{c_{\text{reduced}}} = \frac{\tan\phi}{\tan\phi_{\text{reduced}}} \quad (20)$$

di mana $\sum FK$ ialah faktor kaseselamatan, c dan ϕ ialah kekuatan geser, c_{reduced} dan ϕ_{reduced} ialah nilai c dan ϕ terkecil yang diperolehi semasa program *Plaxis* menunjukkan tanah mengalami kegagalan (*soil body collapse*).

Analisis proses pengiraan ini di dalam kegagalan Mohr-Coulomb digambarkan pada Gambar 2.11. Metode seperti ini dalam program *Plaxis* disebut sebagai "*C-Phi reduction*". Tabel 2.2 menunjukkan tiga cara pengiraan kestabilan cerun dan tambak dengan metode unsur terhingga pada tanah berbijian halus tak tersalir dengan menggunakan program *Plaxis*. Pengiraan pada keadaan tak tersalir dilakukan dengan menggunakan kasesemua cara tersebut. Bila pengiraan keadaan tersalir diperlukan, maka semua parameter masukan dalam parameter berkasusan dan jenis bahan dipilih sebagai tersalir. Model tanah yang dipakai adalah Model Mohr Coulomb.



Gambar 2-12 Proses perhitungan faktor kaseselamatan FK dalam metode unsur terhingga FEM (*Plaxis*, 2004)

Tabel 2-2 Berbagai parameter pada tanah berzarah halus tak tersalir dengan Plaxis (Plaxis, 2004)

Jenis	Parameter			
	Bahan	Kekuatan Geser	Kekakuan	Analisis
Tak Tersalir A	Tak Tersalir	c' ; ϕ' ; ψ'	E'_{50} ; ν'	Tegasan berkasusan
Tak Tersalir B	Tak Tersalir	$c=c$; $\phi=0$; $\psi=0$	E'_{50} ; ν'	Tegasan berkasusan
Tak Tersalir C	Tersalir	$c=c$; $\phi=0$; $\psi=0$	E_u ; $\nu=0.495$	Tegasan jumlah

2.8 Gap Penyelidikan

Penelitian literatur lepas berkaitan perbaikan tanah dalam dengan semen dan lainnya berupa penelitian laboratorium maupun penelitian lapangan skala penuh, serta penelitian analisis numerikal telah dikumpul dan dirumuskan dalam Tabel 2.3. Sebanyak 46 penelitian lepas dari tahun 1995 hingga 2022 telah dikaji bagi mendapatkan gap perbezaan dalam penelitian terkini. Tujuan penelitian, penelitian jenis tanah, penelitian sifat-sifat mekanika tanah, data tanah pada kolom semen tanah untuk analisis kestabilan dibentangkan dalam tabel tersebut.

Berdasarkan kepada kurangnya perhatian pada penelitian uji triaxial tak tepu tak tersalir di laboratorium mekanika tanah dengan uji sampelnya memodelkan kolom semen tanah. Model sampel ini dibuat dengan variasi rasio s/d , di mana s adalah jarak antara kolom tanah semen, d adalah diameter kolom tanah semen. Hasil uji

laboratorium yang berlaku digunakan untuk analisis kestabilan cerun dan tambak trek keretapi berganda sebagai perbincangan kasus di lapangan.

Penelitian-penelitian terdahulu yang terdapat dalam Tabel 2.3 jelas menunjukkan bahwa sebelum ini tiada penelitian khusus uji triaxial tak tersalir tak tepu di laboratorium untuk sampel kolom tanah semen. Ini juga dapat menjelaskan gap antara penelitian ini dengan penelitian-penelitian terdahulu untuk permasalahan rekayasa kolom tanah semen dalam engineering geoteknik.

Tabel 2-3 Literatur lepas untuk gap perbedaan penelitian

No	Objektif Penelitian			Penulis/ Tahun	Jenis Tanah Penelitian			Model Penelitian				Penelitian Sifat-Sifat Mekanika Tanah			Data Tanah pada Kolom Semen Tanah Untuk Analisis Kestabilan						
	Tujuan Penelitian	Kasus Lapangan	Laboratorium		Numerik, lain-lain	Tanah Lunak	Pasir Lepas	Lain-lain	Skala	UDS Kolom	UDS	Model Numerik	Model Skala	Triaxial	Direct Shear	Oedom	Lain-Lain	Sifat Berasingan	Sifat Komposit	Sifat Komposit	Sifat Komposit dari Uji Geser
1	<i>Stability of Embankment Constructed on Soft Soil Treated with Soil-Semen Columns</i>		✓	✓	(Prakash K. G, 2022)	✓				✓	✓				✓		✓		✓		
2	<i>Physical-mechanical assesment of full scale soil semen column constructed in clay soil</i>	✓		✓	(Mustafa Fahmi Hasan, 2022)	✓						✓	✓			✓	✓		✓		✓
3	<i>Modeling of the effect of a high-pressure jet of semen mortar on the surrounding soil environment when performing jet grouting columns using jet technology</i>	✓			(Natalia Zuiavska, 2021)	✓	✓					✓				✓		✓			✓
4	<i>Analysis of impacting factors for soil-semen coloumn combined high strength geogrid</i>			✓	(N. D. M. Nguyen Thai Linh, Nguyen Hai Ha, 2021)	✓		✓									✓		✓		
5	<i>Pore Water Pressure Development in Soft Soil due to Installation and Loading of Controlled Modulus Columns</i>	✓			(L. Bałachowski and J. Konkol, 2021)	✓										✓					✓

6	<i>Assessment of the Efficiency of Rigid Inclusions as a Settlement Control System – Case Study</i>	✓		✓	(Amr A. Hemada, 2021)	✓	✓				✓	✓	✓			✓			✓		
No	Objektif Penelitian				Penulis/ Tahun	Jenis Tanah Penelitian			Model Penelitian				Penelitian Sifat-Sifat Mekanika Tanah			Data Tanah pada Kolom Semen Tanah Untuk Analisis Kestabilan					
	Tujuan Penelitian	Kasus Lapangan	Laboratorium	Numerik, lain-lain		Tanah Lunak	Pasir Lepas	Lain-lain	Skala	UDS Kolom	UDS	Model Numerik	Model Skala	Triaxial	Direct Shear	Oedom	Lain-Lain	Sifat Berasingan	Sifat Komposit	Sifat Komposit	Sifat Komposit dari Uji Geser
7	<i>Large soil-semen column applications in Vietnam</i>	✓			(Minh Ngan Vu 2020)	✓				✓			✓						✓		
8	<i>Integration of information and communication technology (ICT) into semen deep mixing method</i>	✓		✓	(Hong-Son Nguyen, 2020)	✓					✓				✓						✓
9	<i>Full-Scale Experimental Study on the Single and Group of Soil-Semen Columns under Vertical Load Applying for Buildings</i>	✓			(Huu-Do Do, 2020)	✓				✓			✓						✓		✓
10	<i>Experimental study on the settlement of soil semen column combined high strength geogrid.</i>		✓		(Nguyen Thai Linh, 2020)	✓		✓					✓						✓		
11	<i>Dynamic Centrifuge Test of An Embankment Underlain ALiquifiable Soil And Isolated Soil Semen Column</i>		✓		(M. Khosravi, 2020)	✓		✓				✓			✓						✓
12	<i>Ground Improvement for Foundation Support in Organic Soils</i>	✓		✓	(Brian C. Metcalfe, 2020)	✓		✓		✓		✓							✓		✓

13	<i>Field Monitoring of Negative Skin Friction on Rigid Inclusion Columns under Embankments</i>	✓			(J. H. Liang Chern Chow, and Gregory R. Reuter,, 2020)	✓		✓	✓		✓					✓	✓			✓		
No	Objektif Penelitian				Penulis/ Tahun	Jenis Tanah Penelitian			Model Penelitian				Penelitian Sifat-Sifat Mekanika Tanah			Data Tanah pada Kolom Semen Tanah Untuk Analisis Kestabilan						
	Tujuan Penelitian	Kasus	Laboratorium	Numerik, lain-lain		Tanah Lunak	Pasir Lepas	Lain-lain	Skala	UDS Kolom	UDS	Model	Model Skala	Triaxial	Direct Shear	Oedom	Lain-Lain	Sifat	Sifat Komposit	Sifat Komposit	Sifat Komposit dari Uji Geser	Lain-Lain
14	<i>An Overview of Performance Monitoring for Drilled Full Displasemen Type Rigid Inclusions under Highway Embankments</i>	✓			(Liang Chern Chow, 2020)	✓					✓				✓				✓			✓
15	<i>Load Transfer Mechanism of Group of Floating Soil-Semen Column Inmproving Soft Ground</i>	✓			(Khairun Nissa Mat Said 2019)			✓			✓				✓				✓			✓
16	<i>Bearing capacity of composite ground with soil-semen columns under earth fills: Physical and numerical modeling</i>			✓	(Pengpeng Ni, 2019)	✓					✓				✓			✓				✓
17	<i>Experimental Investigation of Soil-Arching Development in Unreinforced and Geosynthetic-Reinforced Pile-Supported Embankments</i>			✓	(Rui Rui, 2019)	✓					✓				✓		✓					

18	<i>Study of the effect of semen amount on the soil-semen sampel strength</i>		✓		(Izabela Karpisz 2018)	✓			✓				✓					✓		
19	<i>Failure and Remedy of Column-Supported Embankment: Case Study</i>	✓			(Radoslaw L. Michalowski, 2018)	✓					✓			✓	✓			✓		✓
No	Objektif Penelitian				Penulis/ Tahun Lain-lain	Jenis Tanah Penelitian			Model Penelitian				Penelitian Sifat-Sifat Mekanika Tanah			Data Tanah pada Kolom Semen Tanah Untuk Analisis Kestabilan				
	Tujuan Penelitian	Kasus Lapangan	Laboratorium	Numerik, lain-lain		Tanah Lunak	Pasir Lepas	Lain-lain	Skala	UDS Kolom	UDS	Model Numerik	Model Skala Penuh	Triaxial	Direct Shear	Oedom	Lain-Lain	Sifat Berasingan	Sifat Komposit	Sifat Komposit
20	<i>Effective Incremental Ground Velocity for Estimating the Peak Sliding Displasemen of Rigid Structures to Pulse-Like Earthquake Ground Motions</i>		✓	✓	(E. Jampole, 2018)			✓	✓						✓			✓		✓
21	<i>Settlement-time curve calculation of soil-semen column and slab improved soft clay deposit</i>		✓		(S. Pongsivasat hit 2017)	✓				✓				✓						✓
22	<i>Long-term strength of soil-semen columns in coastal areas</i>		✓		(Pham Van Ngoc, 2017)	✓				✓			✓	✓	✓			✓		✓
23	<i>Large simple shear testing of soft Bangkok clay stabilized with soil-semen-columns and its application</i>		✓		(Atijit Sukpunya, 2016)	✓		✓							✓			✓		✓

24	<i>An estimation method for predicting final konsolidasi settlement of ground improved by floating soil semen columns</i>		✓		(Ryohei Ishikuraa, 2016)	✓			✓					✓			✓			
No	Objektif Penelitian				Penulis/ Tahun	Jenis Tanah Penelitian			Model Penelitian			Penelitian Sifat-Sifat Mekanika Tanah			Data Tanah pada Kolom Semen Tanah Untuk Analisis Kestabilan					
	Tujuan Penelitian	Kasus Lapangan	Laboratorium	Numerik, lain-lain		Tanah Lunak	Pasir Lepas	Lain-lain	Skala	UDS Kolom	UDS	Model Numerik	Model Skala Penutuh	Triaxial	Direct Shear	Oedom	Lain-Lain	Sifat Beraringan	Sifat Komposit	Sifat Komposit
25	<i>Effect of Semen Column Spacing And Replasemen Ratio on Embankment Bearing Capacity: A Queensland Case Study</i>			✓	(Mark Bolton, 2016)	✓					✓				✓			✓		
26	Behaviors of soil semen columns and stiffened soil semen column wall in shallow excavation	✓			(I. Meepon 2016)	✓		✓				✓				✓		✓		
28	Understanding The Performance Deep Mixed Column Improved Soil- A Review			✓	(Samuel Jonah Abbey, 2015)	✓	✓			✓					✓			✓		✓
29	Numerical Analysis of the Influence of Replasemen			✓	(Le Van Tuan, 2015)			✓			✓			✓		✓				

	Area Ratio in Foundation Reinforced with Soil Semen Columns																			
30	Improving Shear Strength of Clay by Using Semen Column Reinforcement Under Consolidated Undrained Test.		✓		(Damrizal Damoerin, 2015)	✓					✓					✓		✓		
31	Effect of Soil Semen Replacemen Ratio on Settlement Reduction			✓	(Mark Bolton, 2015)	✓						✓	✓					✓		
No	Objektif Penelitian				Penulis/ Tahun	Jenis Tanah Penelitian			Model Penelitian				Penelitian Sifat-Sifat Mekanika Tanah			Data Tanah pada Kolom Semen Tanah Untuk Analisis Kestabilan				
	Tujuan Penelitian	Kasus Lapangan	Laboratorium	Numerik, lain-lain		Tanah Lunak	Pasir Lepas	Lain-lain	Skala	UDS Kolom	UDS	Model Numerik	Model Skala Penuh	Triaxial	Direct Shear	Oedom	Lain-Lain	Sifat Beraringan	Sifat Komposit	Sifat Komposit
32	Centrifugal modeling of a composite foundation combined with soil–semen columns and prefabricated vertical drains		✓		(Guanbao Yea, 2015)	✓			✓						✓			✓		
33	Discussion of “Design and Construction Guidelines for Deep Soil Mixing to Stabilize Expansive Soils”	✓	✓		(Raja S. Madhyanna pu 2015)	✓			✓						✓	✓		✓		
34	Optimization of Design of Column-Reinforced Foundations	✓			(M. Bouassida and J. P. Carter, 2014)	✓					✓			✓	✓			✓		

35	Desigh Risk Of Ground Improvement Methods Including Rigid Inclusions	✓			(J. Wehr, 2013)	✓		✓							✓	✓		✓		
36	Lateral displasemens due to installation of soil-semen columns	✓	✓		(Jinchun Chai, 2012)	✓	✓								✓	✓		✓		
37	A Case History On The Design, Construction, And Field Quality Control Of Semen Deep Soil Mixing	✓			(Suthan Pooranampila, 2012)	✓	✓						✓	✓				✓		
38	Improving mechanical properties and shrinkage cracking characteristics of soft clay in deep soil mixing	✓			(Thanakorn Chompoorat, 2022)	✓									✓			✓		
No	Objektif Penelitian				Penulis/ Tahun	Jenis Tanah Penelitian		Model Penelitian				Penelitian Sifat-Sifat Mekanika Tanah			Data Tanah pada Kolom Semen Tanah Untuk Analisis Kestabilan					
	Tujuan Penelitian	Kasus Lapangan	Laboratorium	Numerik, lain-lain		Tanah Lunak		Tujuan Penelitian	Kasus Lapangan	Laboratorium	Numerik	Tanah Lunak		Tujuan Penelitian	Kasus	Laboratorium	Sifat Berasinoan	Sifat	Sifat Komposit	Sifat Komposit dari Uji Geser
39	Numerical study of the deformation performance and failure mechanisms of TDM pile-supported embankments			✓	(P. J. Chana Phutthananon, Daniel Dias, Pitthaya Jamsawang, 2021)			✓							✓		✓			✓
40	State parameter governing the mechanical properties of semen-treated clays		✓		(Chana Phutthananon, 2022)	✓									✓			✓		✓
41	The Design of Vibro Replasemen	✓			(Heinz J. Priebe, 1995)			✓							✓			✓		

42	<i>Effect of curing conditions on the strength of soil semen</i>		✓		(Salisa Chaiyaput, 2022)	✓		✓					✓		✓	✓			✓	
43	<i>Optimal water-semen ratio of semen-stabilized soil</i>		✓		(Fangtong Wang 2022)	✓			✓				✓						✓	
44	<i>Stabilization nature and unified strength characterization for semen-based stabilized soils</i>		✓		(Li Liu, 2022)	✓			✓							✓				✓
45	<i>Preliminary results of dry Deep Soil Mixing soil-semen composite testing</i>	✓			(Klaudia Jendrysik1, 2018)	✓					✓		✓			✓				✓

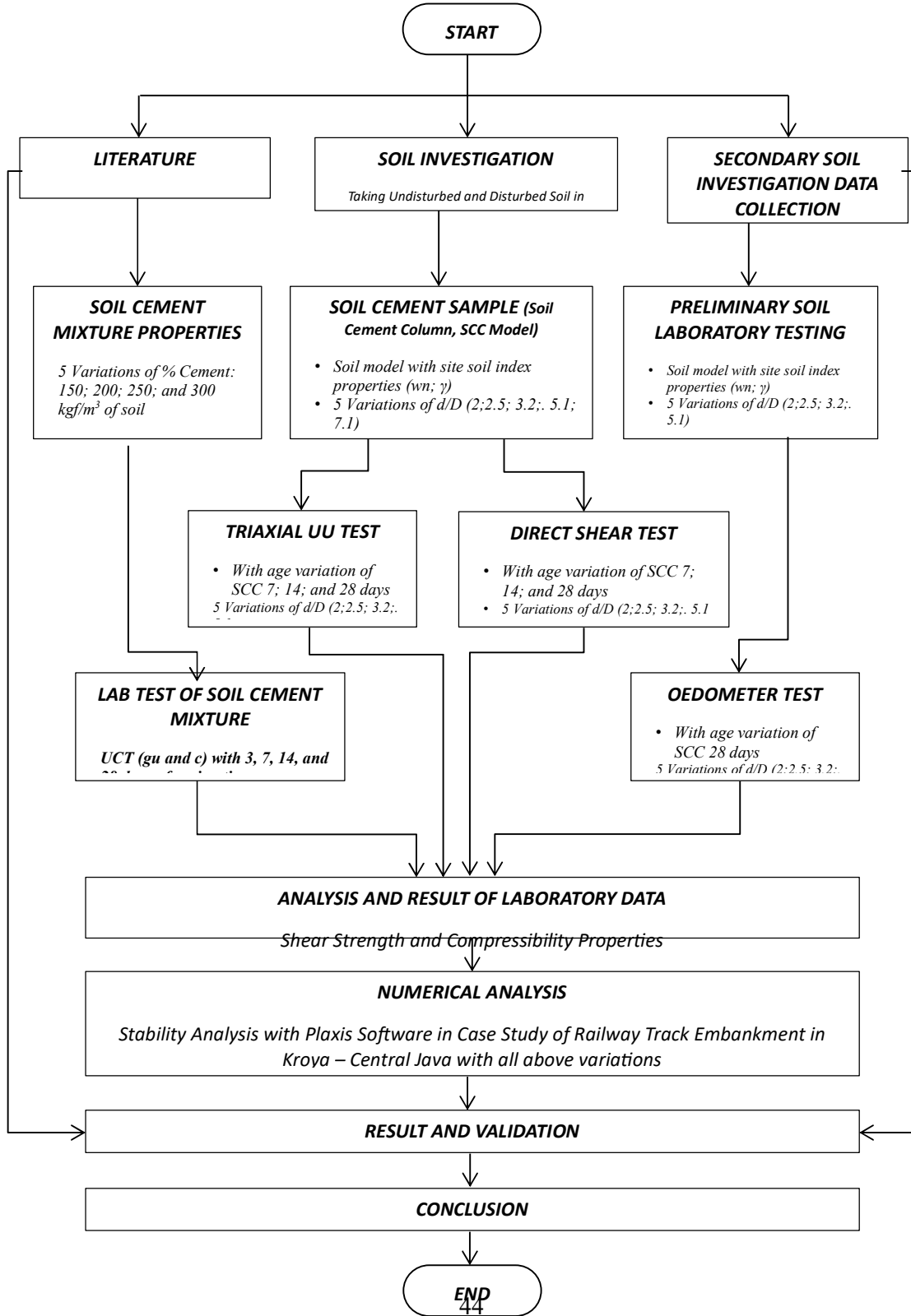
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Pendahuluan

Metodologi penelitian yang dirancang untuk mendapatkan parameter kekuatan tanah komposit dari lempung dan kolom tanah-semen, serta mendapatkan suatu komposisi rekayasa kolom tanah-semen yang optimum. Hasilnya diaplikasikan pada suatu kasus sebagai pembandingan di dalam penggunaan kolom tanah-semen pada proyek trek keretapi berganda jalur Kroya-Purwokerto (Bauer Pratama Indonesia, 2016; Promisco, 2016). Perencanaan pengujian kekuatan gelongsor tanah komposit di rekayasa dengan menggunakan uji triaxial tak tersalir, dengan sampel ujinya berupa tanah tidak terganggu lempung lunak Kroya di bagian tengahnya dengan diameter yang lebih kecil setinggi sampel uji diganti dengan bahan tanah-semen sebagai model dari kolom tanah-semen seperti pada Gambar 3.1.

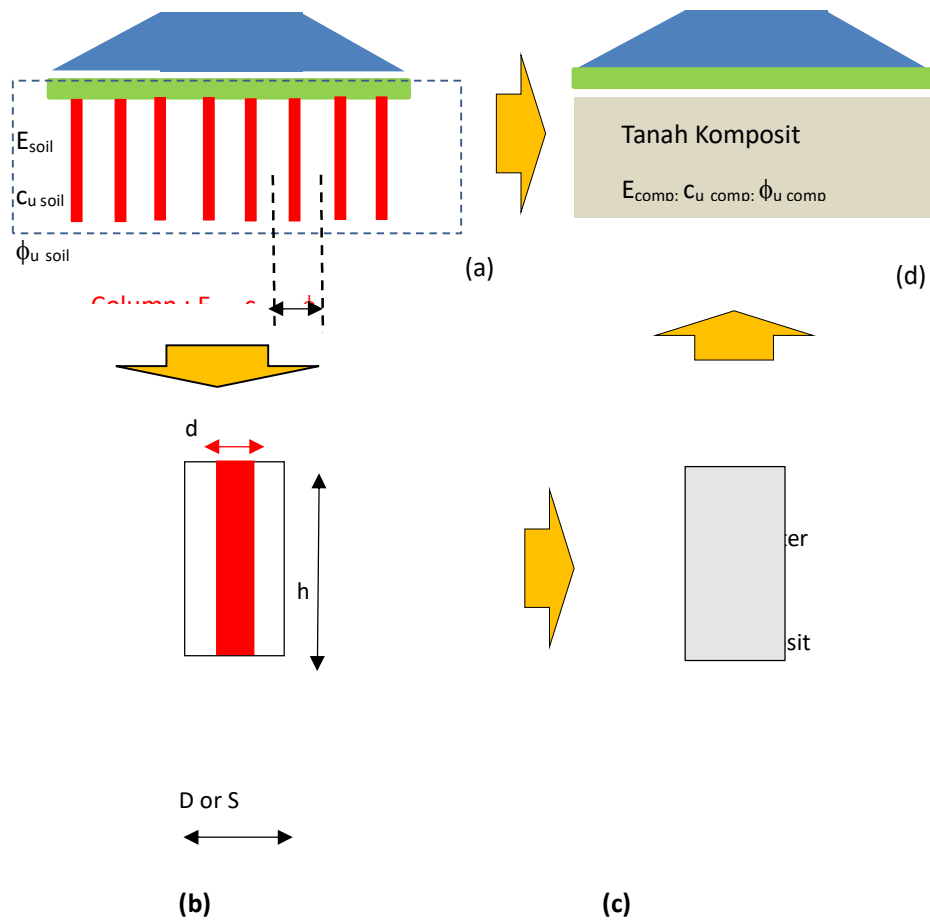
3.2 Rekayasa dan Diagram Alir Penelitian

Pada diagram alir dalam Gambar 3.2 telah disusun rancangan penelitian di laboratorium mekanika dengan tiga pembolehubah model sampel kolom tanah semen (*Soil Cemen Column*, SCC) yang dilakukan uji triaxial tak terkukuh, uji geser langsung dan uji konsolidasi. Ke tiga pembolehubah yang dimaksud adalah yang pertama kandungan semen (kg) terhadap satu meter kubik kolom tanah semen, yaitu 150 kg/m^3 , 200 kg/m^3 , 250 kg/m^3 dan 300 kg/m^3 . Pembolehubah yang kedua adalah rasio antara diameter kolom tanah semen (d) dengan jarak antara kolom tanah semen (S), yaitu $d/S=0.20$, $d/S=0.25$, $d/S=0.32$, $d/S=0.51$ dan $d/S=0.71$. Manakala pembolehubah yang ketiganya ialah masa pemeliharaan model uji sampel, yaitu masa pemeliharaan 7 hari, 28 hari dan 56 hari. Semua hasil uji laboratorium mekanika diatas dipakai untuk penelitian analisis numerik *embankment* dengan menggunakan kolom tanah semen pada kasus subgrade keretapi double track di tanah lempung lunak, di Kroya, Jawa Tengah.



Gambar 3-1 Diagram alir kerja penelitian kolom tanah-semen
3.3 Penguji Lapangan

Penguji lapangan dilakukan untuk mendapatkan maklumat dan data berkaitan tanah dan topografi untuk keperluan analisis kestabilan cerun tambak trek keretapi berganda Kroya-Purwokerto, Jawa Tengah Indonesia, diperolehi dari dokumen projek (Bauer Pratama Indonesia, 2016; Promisco, 2016). Penguji lapangan ulang dilakukan berupa uji sondir sebanyak 2 uji di sisi lapangan uji galian tanah, sebagai bentuk pengesahan dari banyak data yang telah dikumpulkan oleh PT. Promisco Sinergi Indonesia (Promisco, 2016).



Gambar 3-2 (a) Menggunakan sifat tanah dan sifat kolom, (b) Sampel uji triaxial di laboratorium, (c) Hasil kekuatan geser komposit, (d) Analisis dengan komposit tanah

3.3.1 Penguji Tanah

Untuk keperluan data tanah, uji-uji berikut dilakukan:

- (i) Uji galian lubang (*Test Pit*)
- (ii) Uji Penusukan Piawai (SPT).
- (iii) Persampelan tak terganggu menggunakan kotak sampel berdinding nipis (*Thin Stell Plate Box Sampelr*)
- (iv) Persampelan tak terganggu dari uji test pit (*test pit*) untuk uji triaxial diperoleh dari kotak sampel berdinding nipis (*Thin Walled Block Sampelr*)
- (v) Uji Sondir (*Cone Penetration Test/ CPT 2.5 ton*)
- (vi) Persampelan terganggu syal lempung untuk uji sifat indeks, spesifik gravity (Gs), taburan saiz zarah (GSD),

3.3.1 Topografi Lokasi

Pengukuran topografi sangat diperlukan untuk mendapatkan peta aras ketinggian untuk menunjukkan bentuk kecerunan tambak trek keretapi berganda dalam analisis kestabilan cerun dan tambak dengan perkuatan kolom tanah-semen. Gambar topografi untuk keperluan analisis rekayasa geoteknik, diperoleh dari Laporan Tinjauan Teknis Deep Soil Mixing (DSM) Pada Pembangunan Double Track KA Lintas Purwokerto-Kroya (Bauer Pratama Indonesia,2016)

3.4 Model Sampel Persampelan Uji Triaxial dan Uji Oedometer

Sampel untuk uji triaxial dan konsolidasi diperolehi dari uji test pit (*test pit*) tanah hingga kedalaman tertentu. Test pit tanah tersebut berukuran 2 m x 2 m x 1 m (lebar x panjang x dalam). Sampel uji triaxial dan konsolidasi diperolehi di lapangan dengan melakukan penegasan kepada *Thin Stell Box Sampel* berukuran 0.2 m x 0.2 m x 0.6 m (lebar x tinggi x Panjang). Sampel dari box tersebut dipindahkan ke *Wooden Box Sampler* dengan ukuran yang sama dan terlebih dahulu bagian dalamnya dilapisi plastik (*water proof*), dan *Wooden Box Plastic* tersebut bagian luarnya diselimuti

plastik yang rapat. Sebanyak 20 kotak *Wooden Box Sampel* disediakan dan dibawa ke laboratorium mekanika tanah Geoinves untuk pembuatan persampelan uji triaxial dan konsolidasi.



Gambar 3-3 Penguji ulang lapangan berupa uji sondir (CPT) dan uji galian tanah serta pengambilan sampel tanah

Lokasi test pit tanah dibuat hanya berjarak 10 m dari sisi timbunan double trek keretapi yang sudah dibangun, dan dapat dipastikan tanah yang diperoleh dari uji galian tanah tersebut adalah sama dengan keadaan tanah rata-rata pada lokasi kasus tersebut.



Gambar 3-4 Metode persampelan tak terganggu dengan *Thin Stell Plate Box Sampel* pada lapangan pada uji galian tanah untuk uji triaxial dan konsolidasi di laboratorium

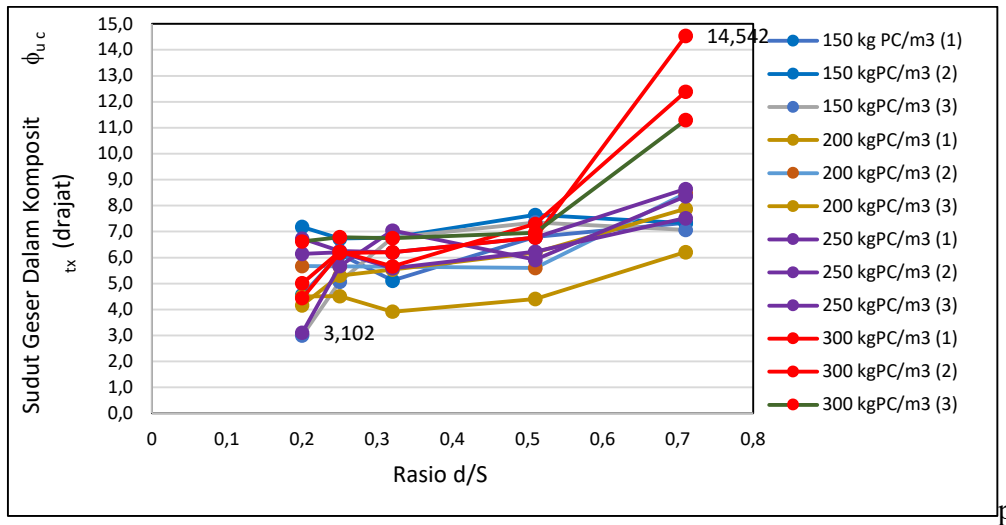
3.5 Uji Laboratorium Mekanika Tanah

Semua uji laboratorium dilakukan mengikut standar ASTM (*American Standard for Testing Bahan*) dan dilakukan di laboratorium mekanika tanah Geoinves di Jakarta.

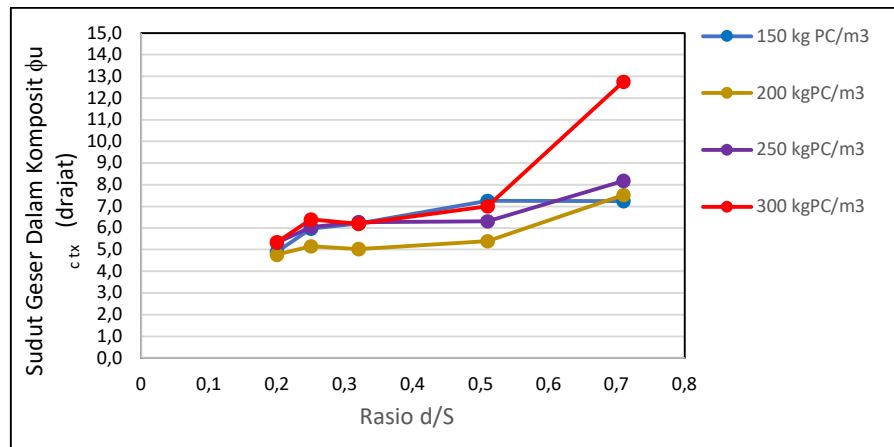
3.5.1 Uji Sifat-Sifat Indeks Lempung Kroya

Semua uji sifat-sifat indeks syal lempung dilakukan berdasarkan standar uji dari *American Standard for Testing Bahan* (ASTM). Uji sifat-sifat indeks ini meliputi uji kandungan air (ASTM D 2216-80, 1989), uji berat unit (ASTM D 653-88, 1989), uji spesifik gravity (ASTM D 854-83, 1989), uji batas atterberg (ASTM D 4318-84, 1989), dan uji Analisa ukuran butir (ASTM D 422-72, 1989).

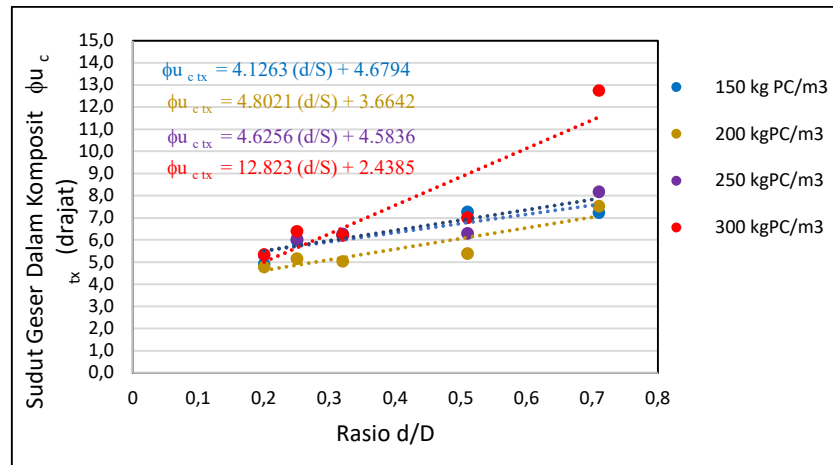




Gambar 6.20 Perubahan sudut geser dalam komposit kolom semen tanah dengan triaxial test akibat variasi rasio d/S dan kandungan semen dengan masa perawatan 56 hari.



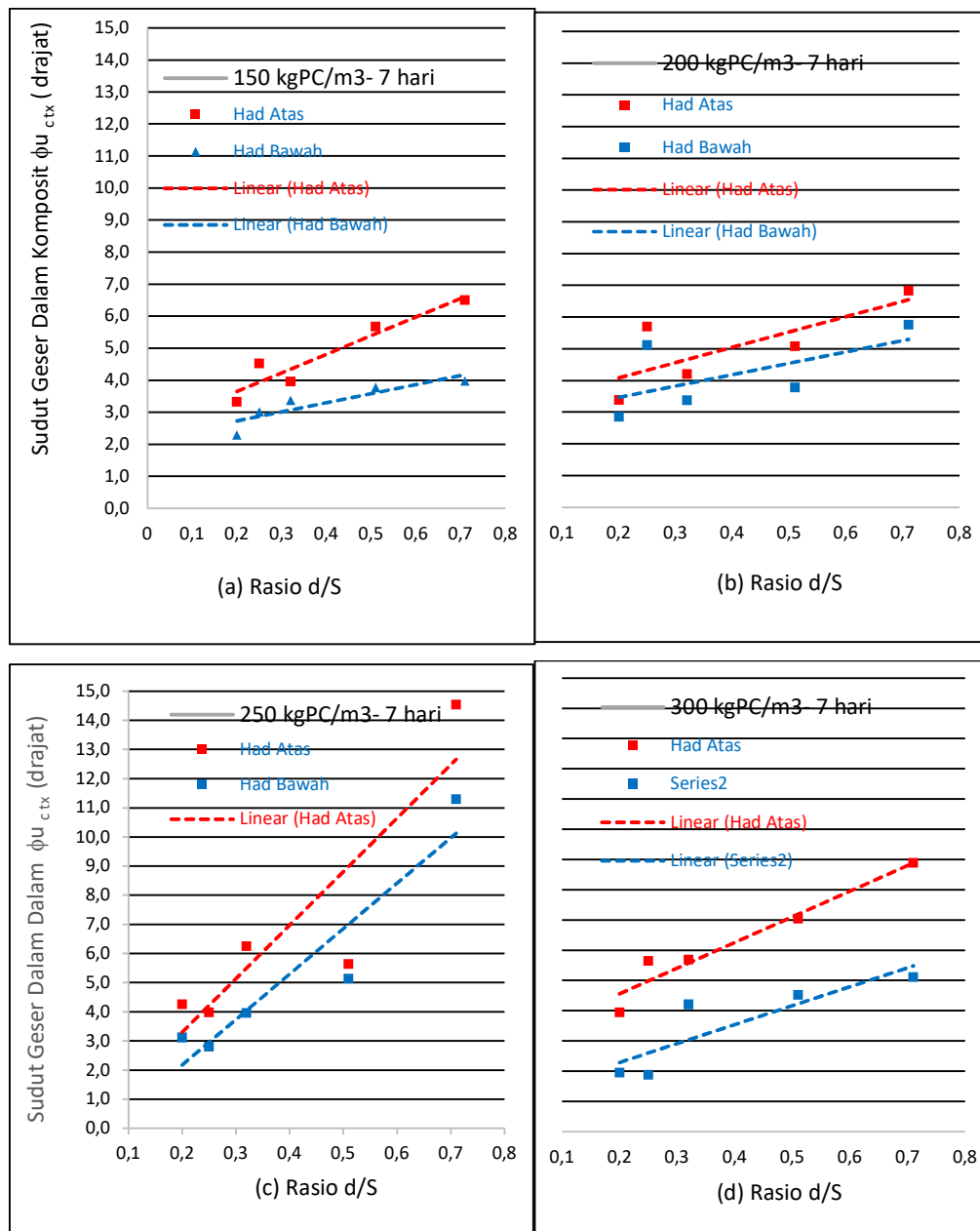
Gambar 6.21 Perubahan sudut geser dalam komposit rata-rata kolom semen tanah dengan triaxial test akibat variasi rasio d/S dan kandungan semen dengan masa perawatan 56 hari



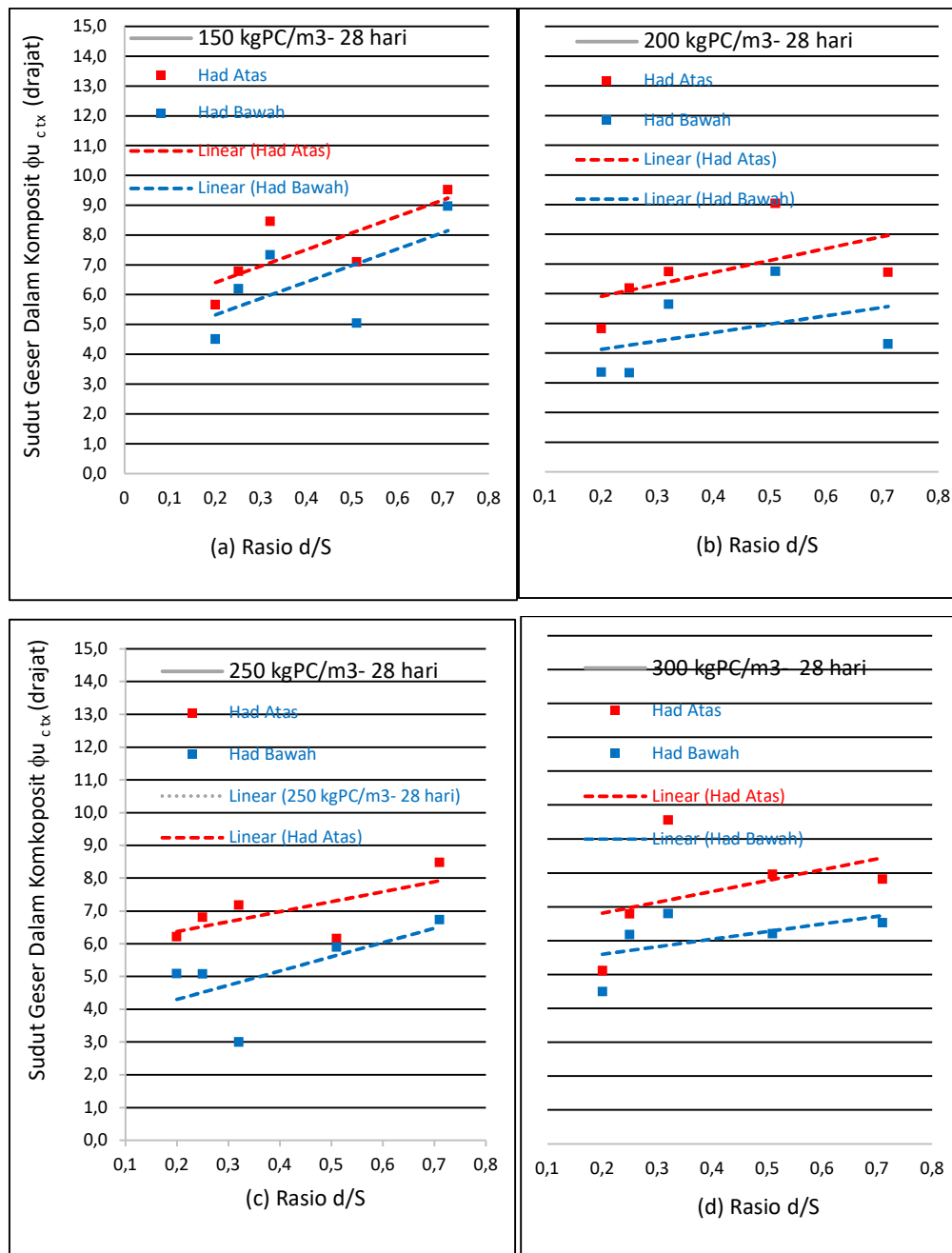
Gambar 6.22 Persamaan sudut geser dalam komposit rata-rata kolom semen tanah dengan triaxial test akibat variasi rasio d/S dan kandungan semen dengan masa perawatan 56 hari.

Had sudut geser dalam komposit maksimuml dan minimum dari hasil triaxial test pada masa uji 7 hari dapat dilihat pada Gambar 6.23, dimana pada Gambar 6.23 (a) had maksimuml dan had minimum sudut geser dalam komposit pada kandungan semen 150 kgPC/m³. Berurutan pada Gambar 6.23 (b) untuk kandungan semen 200 kg/m³, Gambar 6.23 (c) untuk kandungan semen 250 kg/m³ dan pada Gambar 6.23(d) untuk kandungan semen 300 kg/m³. Pada Gambar 6.23 tersebut tampak terjadinya peningkatan had sudut geser dalam komposit maksimuml maupun minimumnya pada masa perawatan 7 hari dengan bertambah kandungan semen dan meningkatnya rasio d/S.

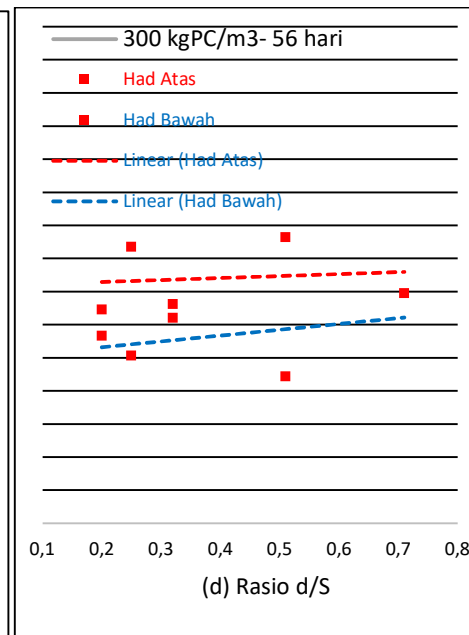
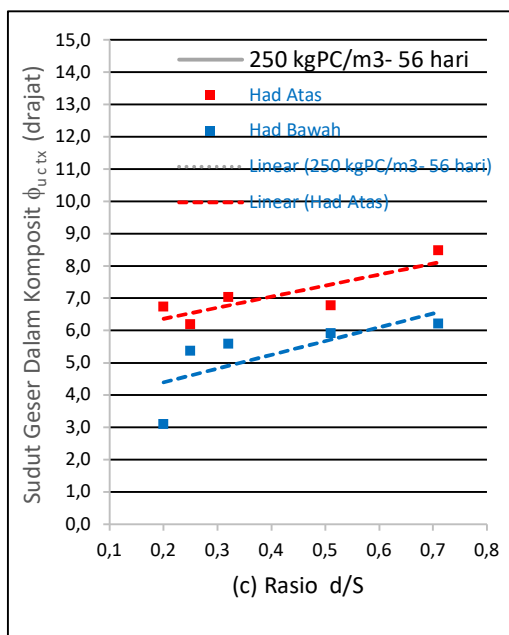
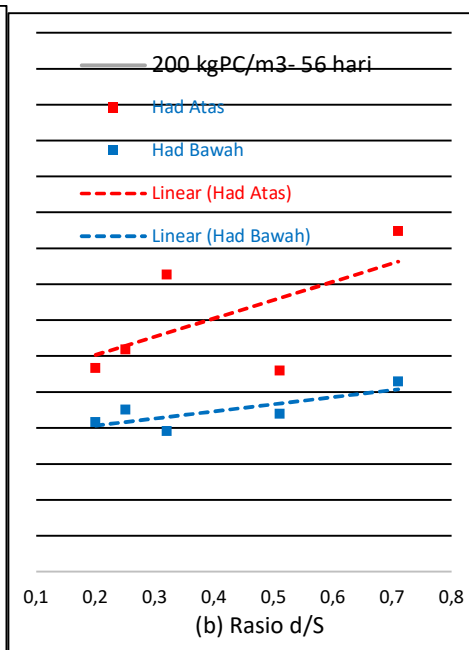
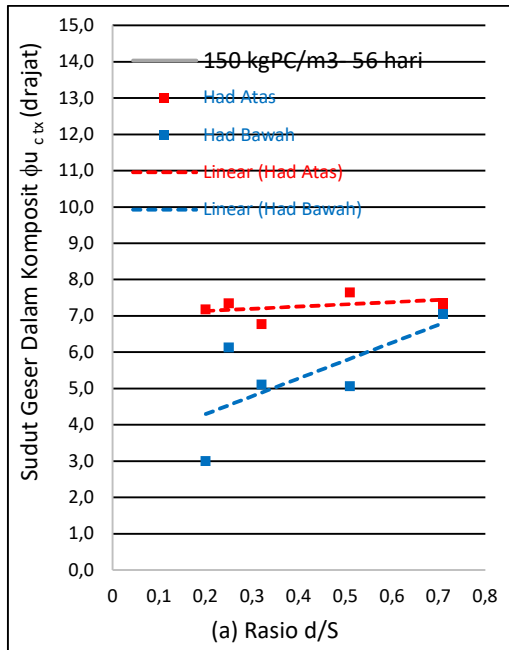
Rentang had sudut geser dalam komposit maksimuml dan minimum tampak konsisten kelakukannya akibat peningkatan masa perawatan 28 hari, namun terdapat perbezaan dari skala besarnya seperti pada Gambar 6.24. Secara signifikan pula bahwa terjadinya rentang had sudut geser dalam maksimuml dan minimum semakin bertambah dengan semakin besarnya rasio d/S. Hal tersebut juga terjadi pada masa perawatan 56 hari, seperti dapat dilihat pada Gambar 6.25.



Gambar 6.23 Had atas dan had bawah sudut geser dalam komposit rata-rata kolom semen tanah terhadap Rasio d/S dan kandungan semen pada masa perawatan 7 hari triaxial test, (a) 150 kgPC/m³, (b) 200 kgPC/m³, (c) 250 kgPC/m³ dan (d) 300 kgPC/m³



Gambar 6.24 Had atas dan had bawah sudut geser dalam komposit rata-rata kolom semen tanah terhadap Rasio d/S dan kandungan semen pada masa perawatan 28 hari triaxial test, (a) 150 kgPC/m³, (b) 200 kgPC/m³, (c) 250 kgPC/m³ dan (d) 300 kgPC/m³



Gambar 6.25 Had atas dan had bawah sudut geser dalam komposit rata-rata kolom semen tanah terhadap Rasio d/S dan kandungan semen pada masa perawatan 56 hari triaxial test, (a) 150 kgPC/m³, (b) 200 kgPC/m³, (c) 250 kgPC/m³ dan (d) 300 kgPC/m³

Persamaan penambahan sudut geser dalam komposit kolom semen tanah dengan triaxial test akibat variasi kandungan semen, rasio d/S dan masa perawatan dapat dilihat pada Tabel 6.8. Hasil persamaan tersebut diperoleh dari Gambar 6.16 untuk masa perawatan 7 hari, Gambar 6.19 untuk masa perawatan 28 hari serta Gambar 6.22 untuk masa perawatan 56 hari. Persamaan tersebut hanya terjadi pada lempung semula jadi dengan kontistensi sangat lembut dengan penambahkuatan kolom semen tanah dengan pelbagai rasio d/S.

Tabel 6.8 Ikhtisar persamaan perubahan sudut geser dalam komposit model sampel kolom semen tanah dari triaxial test

Masa Perawatan (hari)	Kandungan semen (kgPC/m ³)	Persamaan sudut geser dalam komposit $\phi_{u\ c\ tx}$ (°)
7	150	$\phi_{u\ c\ tx} = 5.5066 (d/S) + 2.1118$
7	200	$\phi_{u\ c\ tx} = 4.2652v(d/S) + 2.8772$
7	250	$\phi_{u\ c\ tx} = 6.8673 (d/S) + 2.0615$

7	300	$\phi_{u \text{ c tx}} = 8.6025 \text{ (d/S)} + 1.8147$
28	150	$\phi_{u \text{ c tx}} = 6.1833 \text{ (d/S)} + 3.1851$
28	200	$\phi_{u \text{ c tx}} = 4.9052 \text{ (d/S)} + 4.0458$
28	250	$\phi_{u \text{ c tx}} = 6.3810 \text{ (d/S)} + 4.0270$
28	300	$\phi_{u \text{ c tx}} = 7.5847 \text{ (d/S)} + 3.8588$
56	150	$\phi_{u \text{ c tx}} = 6.463 \text{ (d/S)} + 4.6794$
56	200	$\phi_{u \text{ c tx}} = 4.8021 \text{ (d/S)} + 3.6642$
56	250	$\phi_{u \text{ c tx}} = 4.6256 \text{ (d/S)} + 4.5836$
56	300	$\phi_{u \text{ c tx}} = 12.823 \text{ (d/S)} + 2.4385$

6.2.4 Prosentase Perubahan Sudut Geser Dalam Komposit Model Kolom Tanah Semen Dengan Triaxial test

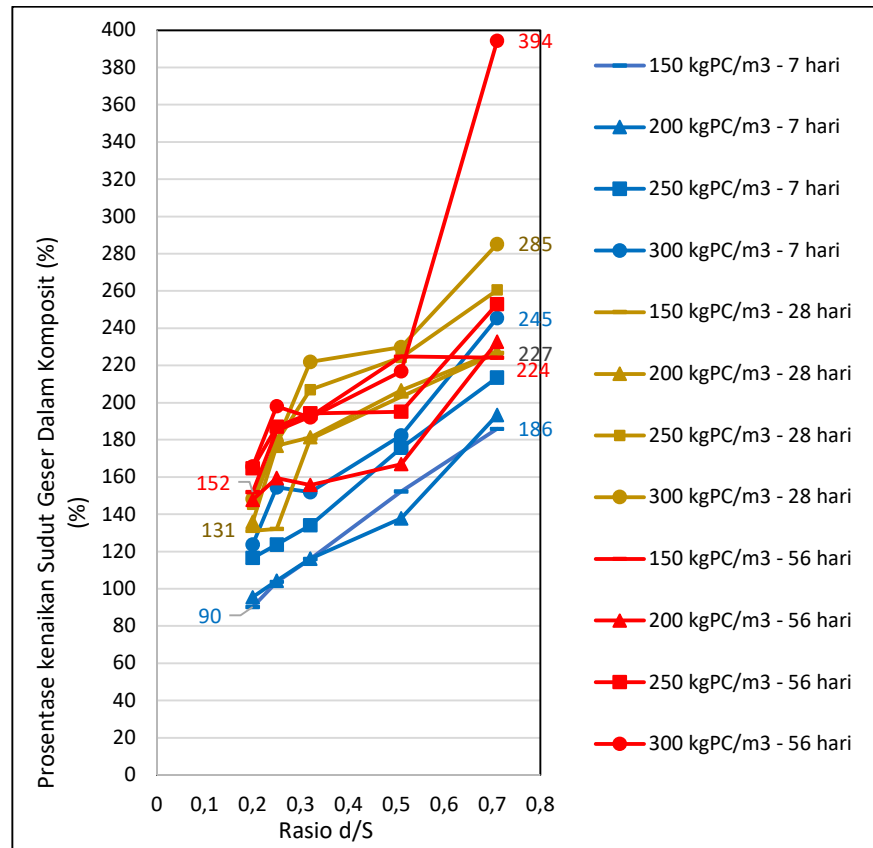
Prosentase perubahan sudut geser dalam komposit dari model kolom semen tanah dari triaxial test menunjukkan pertambahan akibat variasi rasio d/S, Pertambahan prosentase sudut geser dalam komposit juga terjadi dengan pertambahan masa perawatan dari 7 hari hingga 56 hari dan pertambahan kandungan semen dari 150 hingga 300 kgPC/m³, Hal tersebut dapat dilihat dari Gambar 6.26 berikut.

Prosentase pertambahan sudut geser dalam komposit dari triaxial test terjadi dengan merasiokan sudut geser dalam komposit dengan sudut geser dalam semula jadi lempung lembut Kroya. Pada masa perawatan 7 hari, prosentase kenaikan sudut geser dalam komposit minimum terjadi pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 150 kg/m³ yaitu sebesar 90%, Prosentase pertambahan sudut geser dalam komposit akan meningkat dimasa perawatan yang sama dan kandungan semen yang sama hingga 186% bila terjadi pertambahan rasio d/S hingga 0.71. Bila kandungan semennya bertambah hingga 300 kgPC/m³ maka prosentase pertambahan sudut geser dalam komposit akan maksimuml dan bertambah hingga 245 %.

Pada masa perawatan 28 hari, prosentase kenaikan sudut geser dalam komposit minimum terjadi pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 150 kg/m³ yaitu sebesar 131 %, Prosentase pertambahan sudut geser dalam komposit akan meningkat hingga 227 % bila terjadi pertambahan rasio d/S hingga 0.71 pada kandungan semen yang sama. Bila kandungan semen bertambah hingga 300 kgPC/m³ maka prosentase pertambahan sudut geser dalam komposit akan maksimuml dan bertambah hingga 285 %.

Pada masa perawatan 56 hari, prosentase kenaikan sudut geser dalam komposit minimum terjadi pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 150 kg/m³ yaitu sebesar 152 %, Prosentase pertambahan sudut geser dalam komposit akan meningkat hingga 224 % bila terjadi pertambahan rasio d/S hingga 0.71 pada kandungan semen yang sama. Bila kandungan semen bertambah hingga 300 kgPC/m³ maka prosentase pertambahan sudut geser dalam komposit akan maksimuml dan bertambah hingga 394

%. Prosentase pertambahan sudut geser dalam komposit dapat dilihat pada Gambar 6.26 berikut.



6.26 Prosentase perubahan sudut geser dalam komposit model kolom semen tanah dengan triaxial test

6.3 Kekuatan Geser Komposit Model Kolom Tanah Semen Dari Uji Geser Langsung

Kohesi komposit dan sudut geser dalam komposit akan model sampel kolom semen tanah melalui uji geser langsung akan ditentukan perubahan akibat variasi rasio d/S 0.20 hingga d/S 0.71. Variasi lainnya seperti kandungan semen dari 150, 200, 250

dan 300 kgPC/m³, serta masa perawatan sampel mulai dari 7 hari, 28 hari hingga 56 hari.

6.3.1 Kohesi Komposit Model Kolom Tanah Semen Dari Uji Geser Langsung

Pada sampel model kolom semen tanah melalui uji geser langsung memiliki perilaku yang sama dengan triaxial test, namun dengan skala yang berbeda, Semakin besarnya kandungan semen, semakin lama masa perawatan dan semakin besar rasio d/S terjadi peningkatan kohesi komposit (c_{comp}). Pada masa perawatan 7 hari, dengan uji geser langsung terjadi kohesi komposit minimum 9.8 kN/m² pada kandungan semen 150 kgPC/m³ dengan rasio d/S 0.20. Manakala kohesi komposit maksimum 65.1 kN/m² terjadi pada kandungan semen 300 kg/m² dengan rasio d/S 0.71. Perubahan kenaikan kohesi komposit dari semua sampel uji geser langsung pada masa perawatan 7 hari dapat dilihat pada Tabel 6.9 berikut. Manakala pada Gambar 6.27 dapat dilihat perubahan kohesi komposit semua sampel akibat perubahan rasio d/S pada masa perawatan 7 hari. Sedangkan pada Gambar 6.28 dapat dilihat perubahan kohesi komposit rata-rata dengan variasi kandungan semen serta variasi rasio d/S pada masa perawatan 7 hari. Pada Gambar 6.28 dapat dilihat bahwa kenaikan kohesi komposit rata-rata terlihat signifikan mulai dari rasio d/S 0.20 hingga rasio d/S 0.71.

Kohesi komposit rata-rata sangat ketara kenaikannya pada semua rasio d/S dengan masa perawatan 7 hari. Kohesi komposit dengan kandungan semen 150 kgPC/m³ pada rasio d/S 0.2 semula 11.9 kN/m², menjadi 33.5 kN/m² pada rasio d/S 0.71 atau terjadi pertambahan 181.5%. Manakala pada kandungan semen 300 kgPC/m³ dengan rasio d/S 0.20 sebesar 19.5 kN/m² menjadi 59.7 kN/m² pada rasio d/S 0.71, atau terjadi pertambahan 206.2%. Perubahan kohesi komposit rata-rata dapat dilihat pada Gambar 6.28.

Tabel 6.9 Perubahan kohesi komposit kolom tanah semen dengan uji geser langsung masa perawatan 7 hari

No Sampel & Kod		Kohesi komposit (kN/m ²) Pada Rasio d/S				
		0.2	0.25	0.32	0.51	0.71
1	D 150-7	15.263	17.565	20.484	40.397	56.229
2		10.746	19.864	27.758	33.905	48.272
3		9.771	5.611	14.522	18.654	40.663
1	D 200-7	15.065	21.451	24.352	32.818	46.561
2		13.295	20.270	23.613	39.363	49.003
3		8.130	19.124	13.648	25.596	40.732
1	D 250-7	16.215	23.585	23.174	32.640	58.397
2		18.977	21.174	24.547	33.538	51.060
3		13.553	18.865	19.697	33.630	57.337
1	D 300-7	23.586	22.790	37.681	41.536	65.131
2		21.068	36.512	33.784	33.547	62.301
3		13.933	23.795	35.947	31.379	54.202

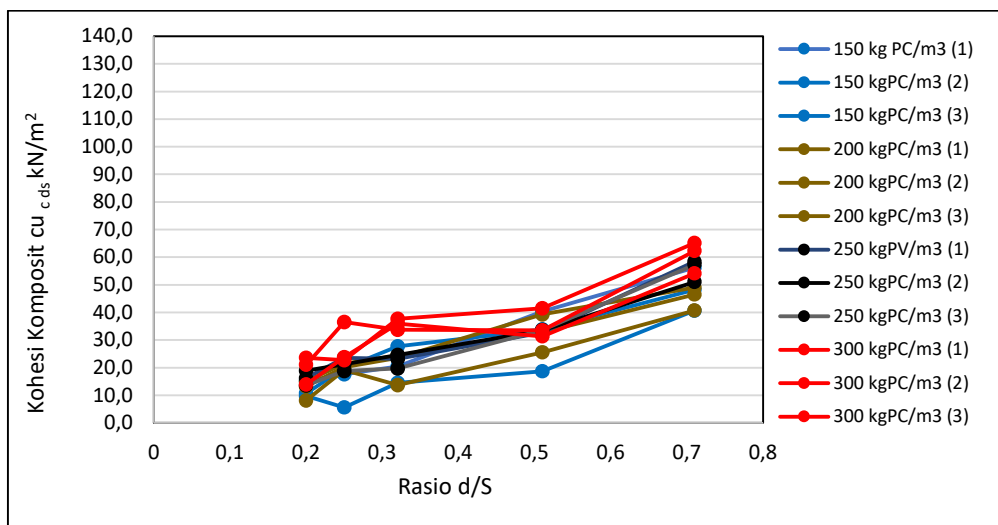
Dari uji geser langsung disetiap kandungan semen terdapat 3 data penelitian seperti terlihat pada Tabel 6.9 pada masa perawatan 7 hari. Dari pada 3 data hasil tersebut terlihat hasilnya terjadi perbezaan. Terdapat data kohesi komposit yang semakin kecil dari atas kebawah pada setia rasio d/S yang sama. Ini terjadi karena pemakaian tegangan normal yang berbeda-beza dari ketiga data tersebut, sehingga menghasilkan kohesi komposit yang berbeda.

Akan tetapi bila dilihat hasil di kandungan semen yang sama, maka kohesi komposit darin uji geser langsung terlihat konsisten bertambah dengan bertambahnya rasio jarak d/S. Ini terjadi karena tegangan normal dari uji geser langsung arah horizontal pada Tabel 6.9 tersebut sama.

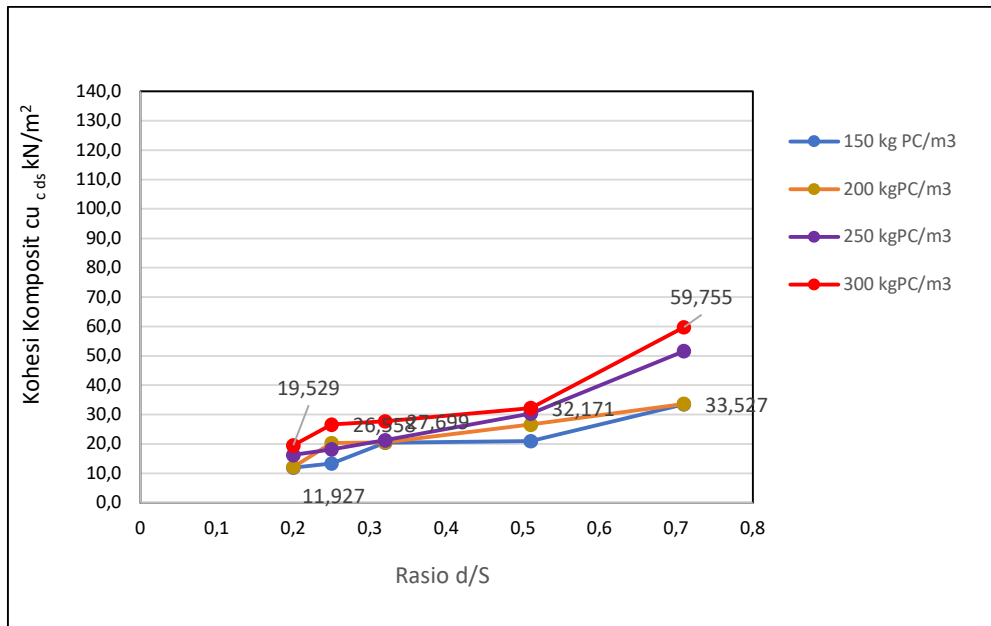
Akan tetapi bila pada Tabel 6.9 yang sama dengan Gambar 6.27, apabila dilakukan hitungan rata-rata, maka terlihat pertambahan kohesi komposit semakin

bertambah dengan pertambahan kandungan semen dan rasio d/S pada masa perawatan 7 hari. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 6.28.

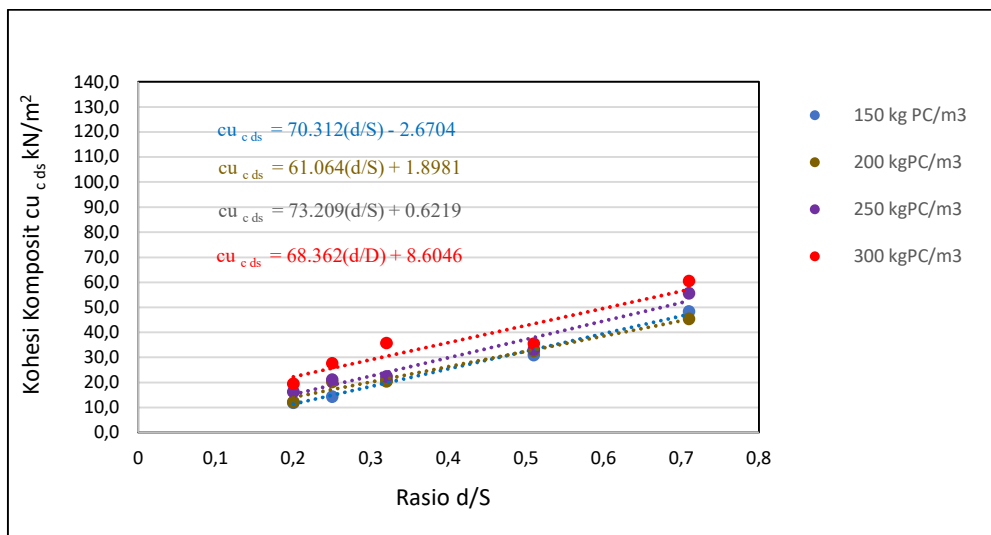
Empat persamaan linear dihasilkan antara kohesi komposit dengan rasio jarak d/S pada empat kandungan semen yang berbeda. Dimulai dari kandungan semen 150 kgPC/m³ hingga 300 kgPC/m³. Persamaan-persamaan linear tersebut dapat dilihat pada Gambar 6.29.



Gambar 6.27 Perubahan kohesi komposit kolom semen tanah dengan uji geser langsung akibat variasi rasio d/S dan kandungan semen dengan masa perawatan 7 hari.



Gambar 6.28 Perubahan kohesi komposit rata-rata kolom semen tanah dengan uji geser langsung akibat variasi rasio d/S dan kandungan semen dengan masa perawatan 7 hari



Gambar 6.29 Persamaan kohesi komposit rata-rata kolom semen tanah dengan uji geser langsung akibat variasi rasio d/S dan kandungan semen dengan masa perawatan 7 hari

Tabel 6.10 Perubahan kohesi komposit kolom tanah semen dengan uji geser langsung masa perawatan 28 hari

No Sampel & Kod		Kohesi komposit (kN/m ²) Pada Rasio d/S				
		0.2	0.25	0.32	0.51	0.71
1	D 150-28	9.696	20.638	32.091	38.530	51.872
2		16.730	11.262	19.267	32.579	26.252
3		-	8.107	9.951	17.678	22.457
1	D200-28	20.638	30.150	30.111	35.071	38.986
2		11.262	23.278	24.024	31.929	36.949
3		8.107	21.378	25.691	22.485	24.960
1	D 250-28	19.185	29.584	46.956	53.322	58.284
2		27.003	18.328	37.161	43.352	49.089
3		9.065	6.682	7.044	21.301	47.407
1	D 300-28	31.075	34.534	36.541	56.835	65.259
2		28.022	30.473	35.322	51.253	66.711
3		13.978	14.666	24.649	25.021	47.296

Dari uji geser langsung disetiap kandungan semen terdapat 3 data penelitian seperti terlihat pada Tabel 6.10 pada masa perawatan 28 hari. Dari pada 3 data hasil tersebut terlihat hasilnya terjadi perbezaan. Terdapat data kohesi komposit yang semakin kecil dari atas kebawah pada setia rasio d/S yang sama. Ini terjadi karena pemakaian tegangan normal yang berbeda-beza dari ketiga data tersebut, sehingga menghasilkan kohesi komposit yang berbeda.

Akan tetapi bila dilihat hasil di kandungan semen yang sama, maka kohesi komposit darin uji geser langsung terlihat konsisten bertambah dengan bertambahnya rasio jarak d/S. Ini terjadi karena tegangan normal dari uji geser langsung arah horizontal pada Tabel 6.10 tersebut sama.

Akan tetapi bila pada Tabel 6.10 yang sama dengan Gambar 6.30, apabila dilakukan hitungan rata-rata, maka terlihat pertambahan kohesi komposit semakin bertambah dengan pertambahan kandungan semen dan rasio d/S pada masa perawatan 7 hari. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 6.31.

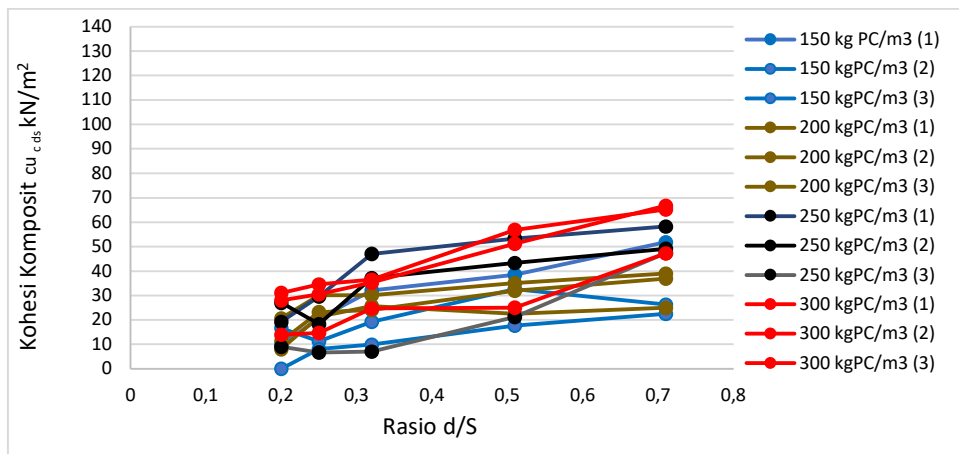
Empat persamaan linear dihasilkan antara kohesi komposit dengan rasio jarak d/S pada empat kandungan semen yang berbeda. Dimulai dari kandungan semen 150

kgPC/m³ hingga 300 kgPC/m³. Persamaan-persamaan linear tersebut dapat dilihat pada Gambar 6.32.

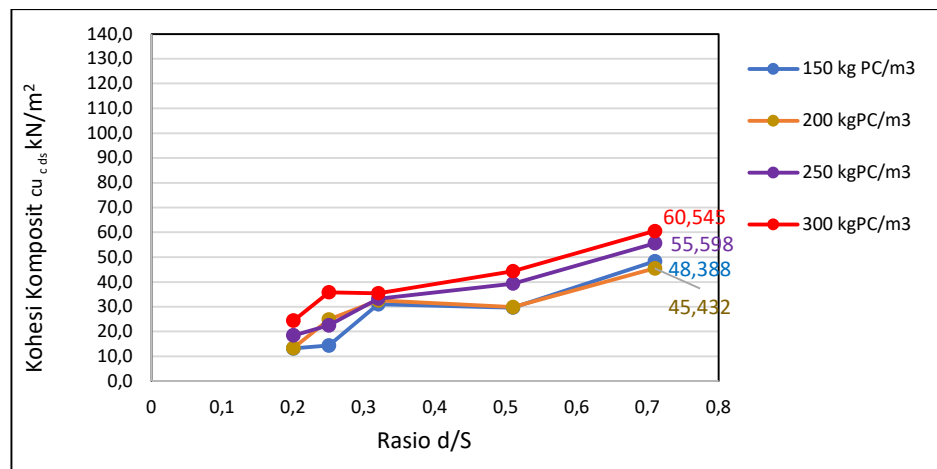
Pada masa perawatan 28 hari dengan uji geser langsung terjadi kohesi komposit minimum 6.9 kN/m² pada kandungan semen 250 kgPC/m³ dengan rasio d/S 0.32. Manakala kohesi komposit maksimum 66.7 kN/m² terjadi pada kandungan semen 300 kg/m² dengan rasio d/S 0.71. Perubahan kenaikan kohesi komposit dari uji geser langsung pada masa perawatan 28 hari dapat dilihat pada Tabel 6.10. Pada Gambar 6.30 dapat dilihat perubahan kohesi komposit semua sampel akibat perubahan rasio d/S pada masa perawatan 28 hari. Sedangkan pada Gambar 6.31 dapat dilihat perubahan kohesi komposit rata-rata dari semua data pada masa perawatan 28 hari dengan variasi kandungan semen serta variasi rasio d/S.

Empat persamaan linear dihasilkan antara kohesi komposit dengan rasio jarak d/S pada empat kandungan semen yang berbeda. Dimulai dari kandungan semen 150 kgPC/m³ hingga 300 kgPC/m³. Persamaan-persamaan linear tersebut dapat dilihat pada Gambar 6.32.

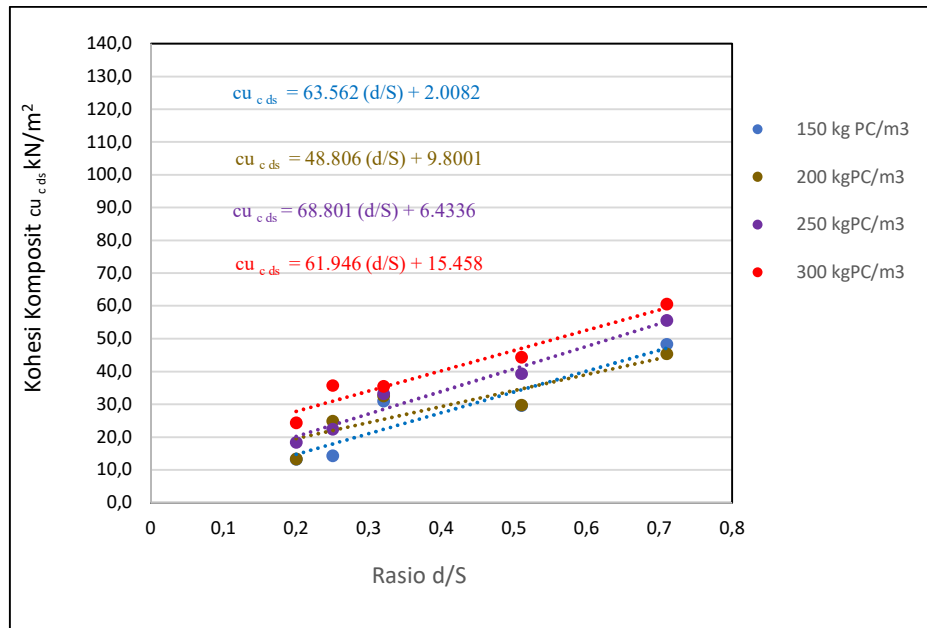
Kohesi komposit rata-rata maksimum pada masa perawatan 28 hari dengan uji riicuh langsung sangat ketara peningkatannya, pada rasio d/S 0.71 dengan kandungan semen 150 kgPC/m³ menjadi 48.39 kN/m² atau terjadi pertambahan 151.3 %. Pada kandungan semen 200 kgPC/m³, yaitu sebesar 45.54 kN/m² atau terjadi pertambahan 141.8 %, dan pada kandungan semen 250 kgPC/m³ menjadi 55.6 kN/m² atau terjadi pertambahan sebesar 175.3%. Manakala bila kandungan semen 300 kgPC/m³ menjadi 60.5 kN/m² atau terjadi penambahan 191.7 % dari kohesi semula jadi.



Gambar 6.30 Perubahan kohesi komposit kolom semen tanah dengan uji geser langsung akibat variasi rasio d/S dan kandungan semen dengan masa perawatan 28 hari.



Gambar 6.31 Perubahan kohesi komposit rata-rata kolom semen tanah dengan uji geser langsung akibat variasi rasio d/S dan kandungan semen dengan masa perawatan 28 hari



Gambar 6.32 Persamaan kohesi komposit rata-rata kolom semen tanah dengan uji geser langsung akibat variasi rasio d/S dan kandungan semen dengan masa perawatan 28 hari

Tabel 6.11 Perubahan kohesi komposit kolom tanah semen dengan triaxial test masa perawatan 56 hari

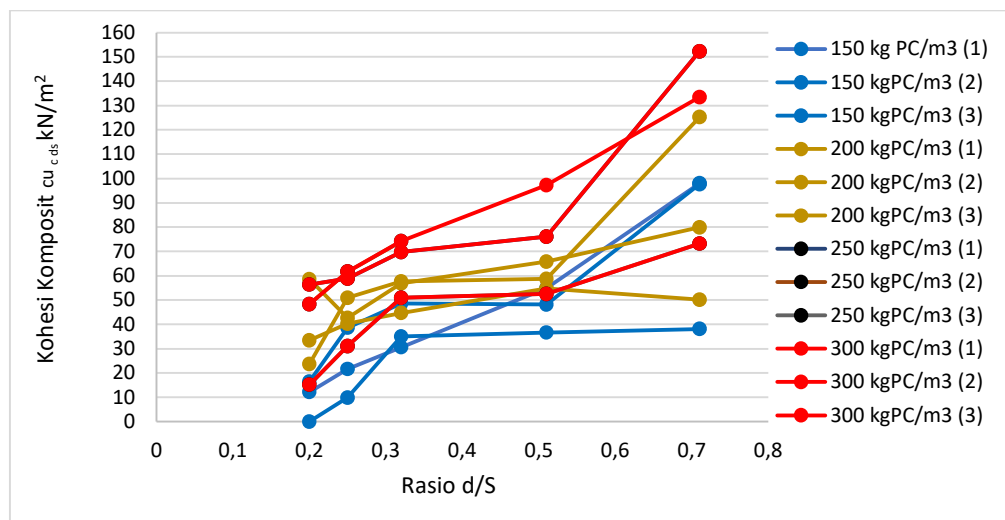
No Sampel & Kod		Kohesi komposit (kN/m ²) Pada Rasio d/S				
		0.2	0.25	0.32	0.51	0.71
1	D 150-56	12.180	21.693	30.593	54.861	98.015
2		16.426	38.588	48.510	48.224	97.688
3		-	9.873	35.014	36.588	38.090
1	D 200-56	23.671	50.904	57.773	58.709	125.230
2		58.555	42.619	56.808	65.723	79.937
3		33.442	40.226	44.743	54.798	50.125
1	D 250-56	54.861	58.081	58.817	62.281	65.108
2		48.224	48.306	54.176	69.202	138.170
3		36.588	50.952	55.193	62.566	61.993
1	D 300-56	56.297	58.817	69.689	76.105	152.290
2		48.306	61.650	74.174	97.233	133.490
3		15.165	31.032	50.952	52.468	73.156

Dari uji geser langsung disetiap kandungan semen terdapat 3 data penelitian seperti terlihat pada Tabel 6.11 pada masa perawatan 56 hari. Dari pada 3 data hasil tersebut terlihat hasilnya terjadi perbezaan. Terdapat data kohesi komposit yang semakin kecil dari atas kebawah pada setia rasio d/S yang sama. Ini terjadi karena pemakaian tegangan normal yang berbeda-beza dari ketiga data tersebut, sehingga menghasilkan kohesi komposit yang berbeda.

Akan tetapi bila dilihat hasil di kandungan semen yang sama, maka kohesi komposit darin uji geser langsung terlihat konsisten bertambah dengan bertambahnya rasio jarak d/S. Ini terjadi karena tegangan normal dari uji geser langsung arah horizontal pada Tabel 6.11 tersebut sama.

Akan tetapi bila pada Tabel 6.11 yang sama dengan Gambar 6.33, apabila dilakukan hitungan rata-rata, maka terlihat pertambahan kohesi komposit semakin bertambah dengan pertambahan kandungan semen dan rasio d/S pada masa perawatan 7 hari. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 6.34.

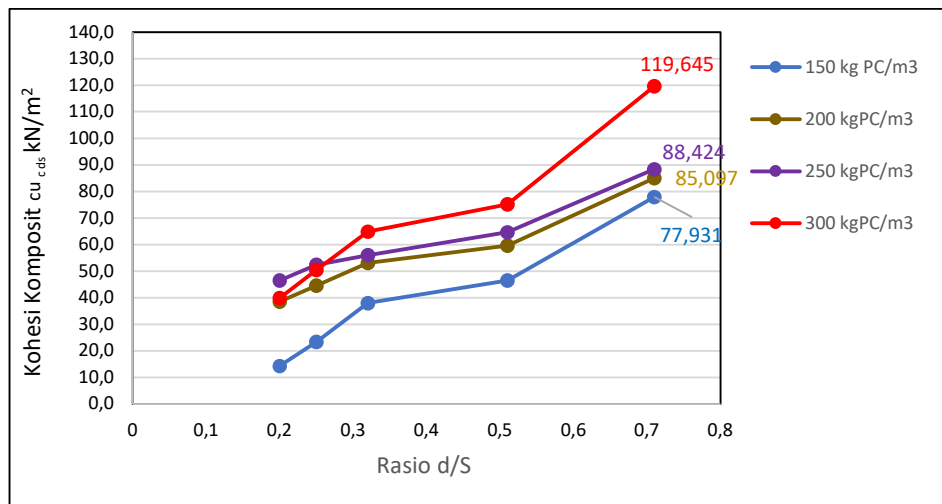
Empat persamaan linear dihasilkan antara kohesi komposit dengan rasio jarak d/S pada empat kandungan semen yang berbeda. Dimulai dari kandungan semen 150 kgPC/m³ hingga 300 kgPC/m³. Persamaan-persamaan linear tersebut dapat dilihat pada Gambar 6.35.



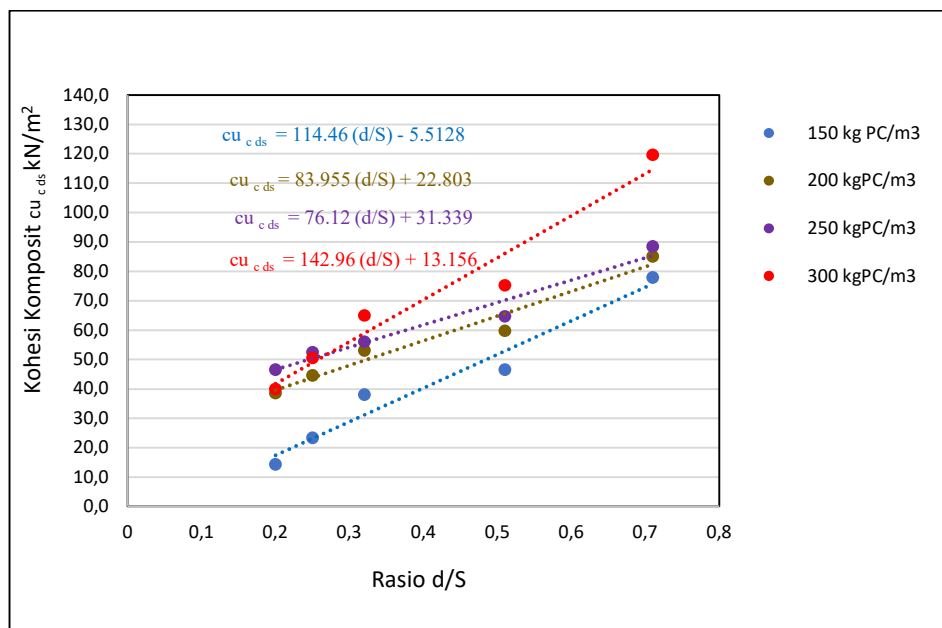
Gambar 6.33 Perubahan kohesi komposit kolom semen tanah dengan uji geser langsung akibat variasi rasio d/S dan kandungan semen dengan masa perawatan 56 hari.

Pada masa perawatan 56 hari dengan uji riicuh langsung terjadi kohesi komposit minimum 9.9 kN/m^2 pada kandungan semen 150 kgPC/m^3 dengan rasio d/S 0.25. Manakala kohesi komposit maksimum 152.3 kN/m^2 terjadi pada kandungan semen 300 kg/m^2 dengan rasio d/S 0.71. Perubahan kenaikan kohesi komposit dari semua sampel uji geser langsung pada masa perawatan 56 hari dapat dilihat pada Tabel 6.11. Manakala pada Gambar 6.33 dapat dilihat perubahan kohesi komposit semua sampel akibat perubahan rasio d/S pada masa perawatan 56 hari. Sedangkan pada Gambar 6.34 dapat dilihat perubahan kohesi komposit rata-rata dari semua data pada masa perawatan 56 hari dengan variasi kandungan semen serta variasi rasio d/S.

Kohesi komposit rata-rata maksimum pada masa perawatan 56 hari dengan uji geser langsung pada Gambar 6.34 sangat lebih ketara peningkatannya, pada rasio d/S 0.71 dengan kandungan semen 150 kgPC/m^3 menjadi 77.9 kN/m^3 atau terjadi pertambahan 249.7 %. Pada kandungan semen 200 kgPC/m^3 , yaitu sebesar 85.1 kN/m^2 atau terjadi pertambahan 273.7 %, dan pada kandungan semen 250 kgPC/m^3 menjadi 88.4 kN/m^2 atau terjadi pertambahan sebesar 284.7%. Manakala bila kandungan semen 300 kgPC/m^3 menjadi 119.6 kN/m^2 atau terjadi penambahan 388.7 % dari kohesi semula jadi.



Gambar 6.34 Perubahan kohesi komposit rata-rata kolom semen tanah dengan uji geser langsung akibat variasi rasio d/S dan kandungan semen dengan masa perawatan 56 hari



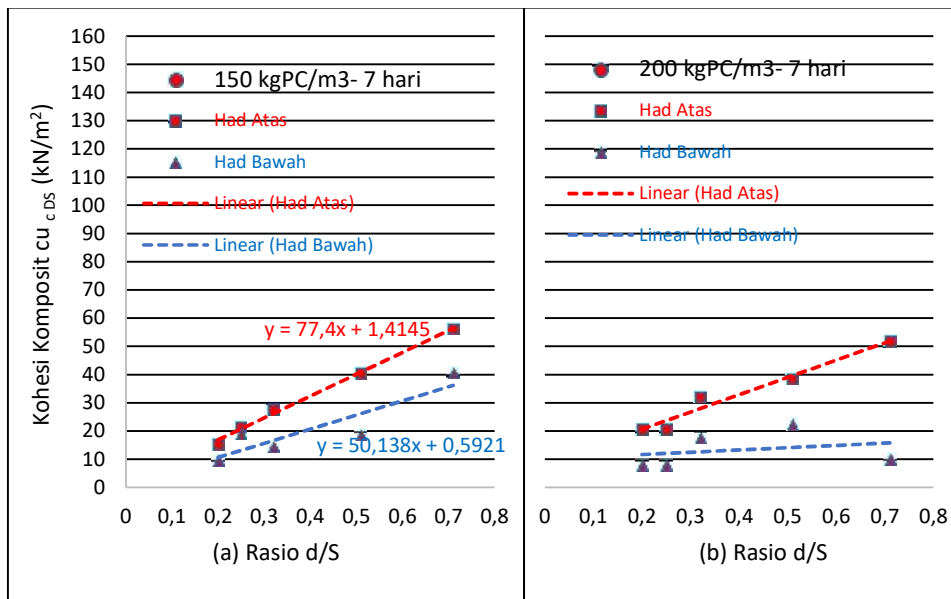
Gambar 6.35 Persamaan kohesi komposit rata-rata kolom semen tanah dengan uji geser langsung akibat variasi rasio d/S dan kandungan semen dengan masa perawatan 56 hari

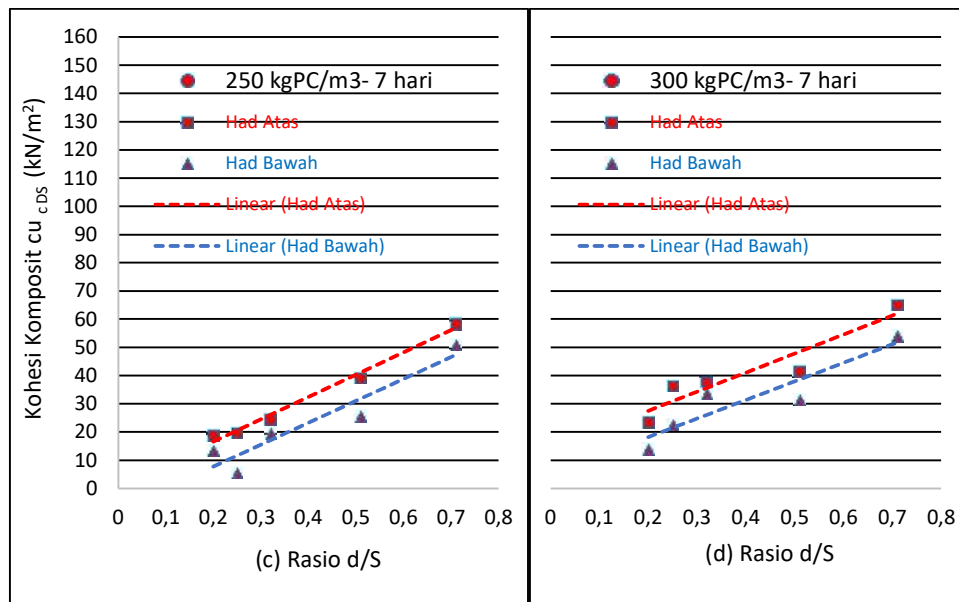
Persamaan penambahan kohesi komposit kolom semen tanah dengan uji geser langsung akibat variasi kandungan semen, variasi rasio d/S dan variasi masa perawatan dapat dilihat pada Tabel 6.12 berikut. Hasil persamaan tersebut diperoleh dari Gambar. 6.29 untuk masa perawatan 7 hari, Gambar 6.32 untuk masa perawatan 28 hari serta Gambar 6.35 untuk masa perawatan 56 hari. Persamaan tersebut hanya terjadi pada lempung semula jadi dengan kontistensi sangat lembut dengan penambahkuatan kolom semen tanah dengan variasi rasio d/S.

Tabel 6.12 Ikhtisar persamaan perubahan kejelekikan komposit model sampel kolom semen tanah dari uji geser langsung

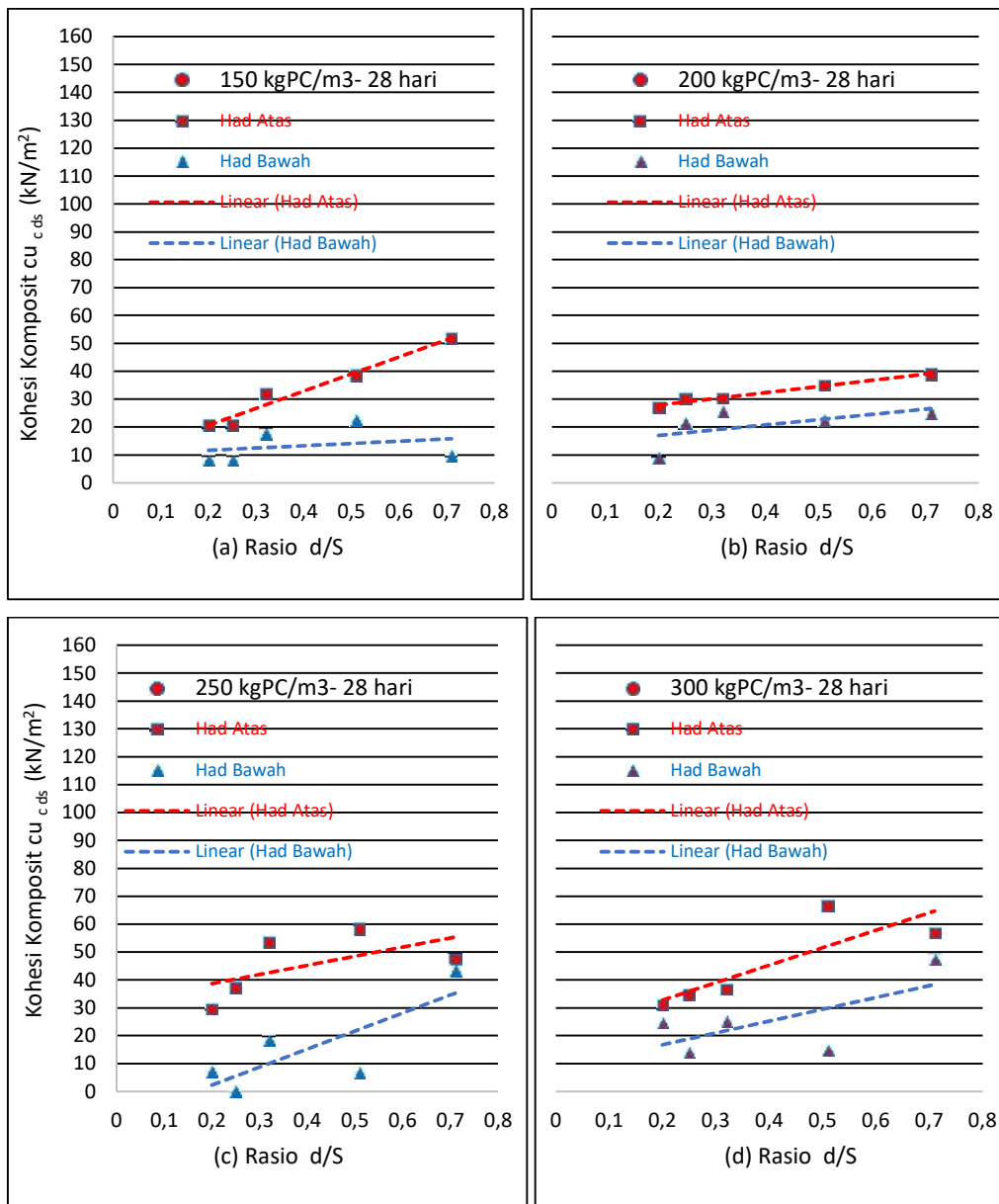
Masa Perawatan (hari)	Kandungan semen (kgPC/m ³)	Persamaan kohesi komposit $c_{u\ c\ ds}$ (kN/m ²)
7	150	$c_{u\ c\ ds} = 70.312(d/S) - 2.6704$
7	200	$c_{u\ c\ ds} = 61.064(d/S) + 1.8981$

7	250	$c_{u_{c_{ds}}} = 73.209(d/S) + 0.6219$
7	300	$c_{u_{c_{ds}}} = 68.362(d/D) + 8.6046$
28	150	$c_{u_{c_{ds}}} = 63.562 (d/S) + 2.0082$
28	200	$c_{u_{c_{ds}}} = 48.806 (d/S) + 9.8001$
28	250	$c_{u_{c_{ds}}} = 68.801 (d/S) + 6.4336$
28	300	$c_{u_{c_{ds}}} = 61.946 (d/S) + 15.458$
56	150	$c_{u_{c_{ds}}} = 114.46 (d/S) - 5.5128$
56	200	$c_{u_{c_{ds}}} = 83.955 (d/S) + 22.803$
56	250	$c_{u_{c_{ds}}} = 76.12 (d/S) + 31.339$
56	300	$c_{u_{c_{ds}}} = 142.96 (d/S) + 13.156$

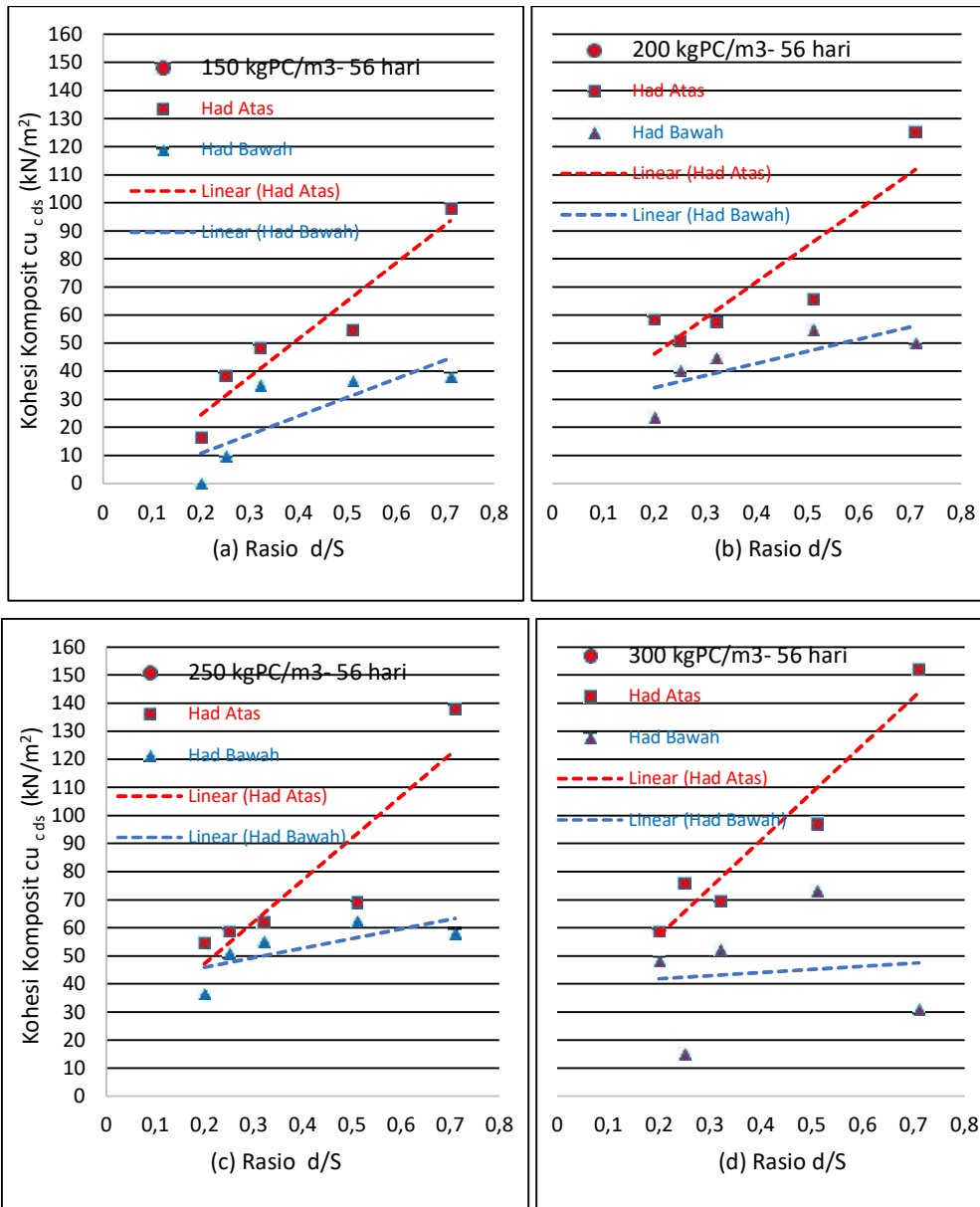




Gambar 6.36 Had atas dan had bawah kohesi komposit rata-rata kolom semen tanah terhadap Rasio d/S dan kandungan semen pada masa perawatan 7 hari dengan uji geser langsung, (a) 150 kgPC/m³, (b) 200 kgPC/m³, (c) 250 kgPC/m³ dan (d) 300 kgPC/m³



Gambar 6.37 Had atas dan had bawah kohesi komposit rata-rata kolom semen tanah terhadap Rasio d/S dan kandungan semen pada masa perawatan 28 hari dengan uji geser langsung, (a) 150 kgPC/m³, (b) 200 kgPC/m³, (c) 250 kgPC/m³ dan (d) 300 kgPC/m³



Gambar 6.38 Had atas dan had bawah kohesi komposit rata-rata kolom semen tanah terhadap Rasio d/S dan kandungan semen pada masa perawatan 56 hari dengan uji geser langsung, (a) 150 kgPC/m³, (b) 200 kgPC/m³, (c) 250 kgPC/m³ dan (d) 300 kgPC/m³

Had kohesi komposit maksimum dan minimum dari hasil uji geser langsung pada masa uji 7 hari dapat dilihat pada Gambar 6.36, dimana pada Gambar 6.36 (a) had maksimum dan had minimum kohesi komposit pada kandungan semen 150 kgPC/m³. Berurutan pada Gambar 6.36 (b) untuk kandungan semen 200 kg/m³, Gambar 6.36 (c) untuk kandungan semen 250 kg/m³ dan pada Gambar 6.36 (d) untuk kandungan semen 300 kg/m³. Dari ke empat Gambar 6.36 tersebut tampak terjadinya peningkatan had kohesi komposit maksimum maupun minimumnya pada masa perawatan 7 hari dengan bertambah kandungan semen dan meningkatnya rasio d/S.

Rentang had kohesi komposit maksimum dan minimum dari uji geser langsung tampak konsisten kelakukannya akibat peningkatan masa perawatan 28 hari, namun terdapat perbedaan skala besarnya seperti pada Gambar 6.37. Seperti pada triaxial test, dari uji geser langsung secara ketara pula bahwa terjadinya rentang had kohesi maksimum dan minimum semakin bertambah dengan semakin besarnya rasio d/S. Hal tersebut juga terjadi pada masa perawatan 56 hari, seperti dapat dilihat pada Gambar 6.38. Terjadi sedikit perbedaan antara had kohesi komposit maksimum dan minimum akibat uji geser langsung pada kandungan semen 300 kg/m³ dengan masa perawatan 56 hari, dimana rentang had maksimum dan minimumnya tampak konsisten dengan bertambahnya rasio d/S, Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 6.38.

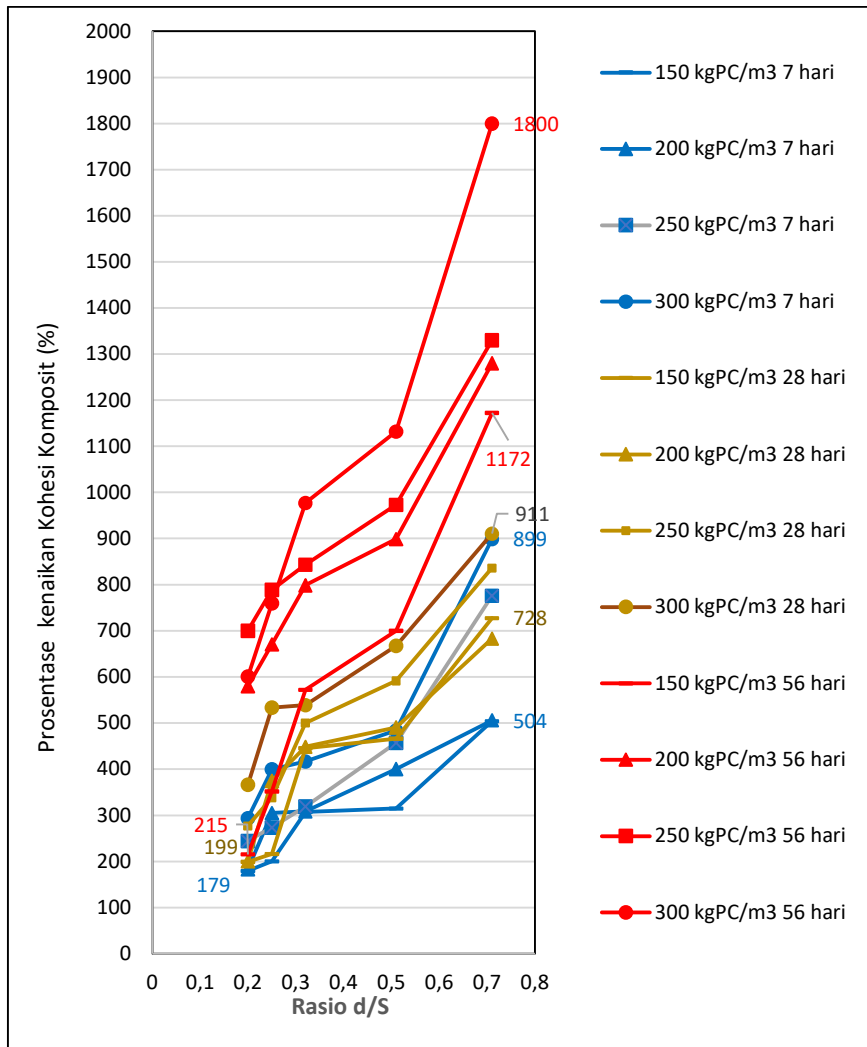
6.3.2 Prosentase Perubahan Kohesi Komposit Model Kolom Semen Tanah Dengan Uji Geser Langsung

Prosentase perubahan kohesi komposit dari model kolom semen tanah dari uji geser langsung menunjukkan pertambahan akibat variasi rasio d/S, Pertambahan prosentase kohesi komposit juga terjadi dengan pertambahan masa perawatan dari 7 hari hingga 56 hari dan pertambahan kandungan semen dari 150 hingga 300 kgPC/m³, Hal tersebut dapat dilihat dari Gambar 6.39 berikut.

Prosentase pertambahan kohesi komposit dari geser langsung terjadi dengan merasiokan kohesi komposit dengan kohesi semula jadi lempung lembut Kroya. Prosentase kenaikan kohesi komposit minimum terjadi pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 150 kg/m³ pada masa perawatan 7 hari, yaitu sebesar 179 %, Prosentase pertambahan kohesi komposit akan meningkat dimasa perawatan yang sama dan kandungan semen yang sama hingga 504 % bila terjadi pertambahan rasio d/S hingga 0.71. Bila kandungan semennya bertambah hingga 300 kgPC/m³ maka prosentase pertambahan kohesi komposit akan maksimum dan bertambah hingga 899 %.

Pada masa perawatan 28 hari, prosentase kenaikan kohesi komposit minimum terjadi pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 150 kg/m³ yaitu sebesar 199 %, Prosentase pertambahan kohesi komposit akan meningkat hingga 728 % bila terjadi pertambahan rasio d/S hingga 0.71 pada kandungan semen yang sama. Bila kandungan semen bertambah hingga 300 kgPC/m³ maka prosentase pertambahan kohesi komposit akan maksimum dan bertambah hingga 911 %.

Pada masa perawatan 56 hari, prosentase kenaikan kohesi komposit minimum terjadi pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 150 kg/m³ yaitu sebesar 215 %, Prosentase pertambahan kohesi komposit akan meningkat hingga 1172 % bila terjadi pertambahan rasio d/S hingga 0.71 pada kandungan semen yang sama. Bila kandungan semen bertambah hingga 300 kgPC/m³ maka prosentase pertambahan kohesi komposit akan maksimum dan bertambah hingga 1800 %. Prosentase pertambahan kohesi komposit dari uji geser langsung dapat dilihat pada Gambar 6.39 berikut.



Gambar 6.39 Prosentase perubahan kohesi komposit model kolom semen tanah dengan uji geser langsung

6.3.3 Sudut Geser Dalam Komposit Kolom Semen Tanah Dari Uji Geser Langsung Model Kolom Semen Tanah

Kekuatan geser yang terjadi dari triaxial test dan uji geser langsung hasilnya tidaklah sama, karena perbezaan bidang satah kegagalan yang terjadi berbeda pada kedua uji tersebut. Pada umumnya kekuatan geser dari uji geser langsung akan terjadi lebih besar daripada kekuatan geser dengan triaxial test.

Rasio kekuatan geser rata-rata semula jadi lempung lembut Kroya yang terjadi dari triaxial test 0.132, sedangkan dari uji geser langsung sebesar 0.144. Sehingga prosentase perbezaan antara kekuatan geser uji geser langsung dengan uji tiga pasi pada lempung lembut semula jadi sebesar 9.1 %.

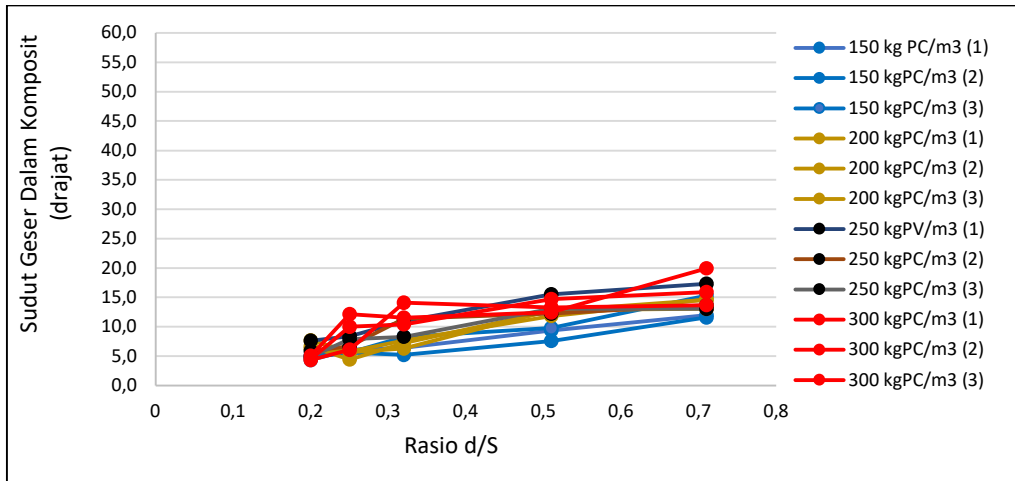
Sudut geser dalam komposit akan bertambah secara signifikan melalui penambahbaikan berupa kolom semen tanah melalui uji geser langsung dengan sampel model kolom semen tanah. Hingga pada masa perawatan 7 hari dengan rasio d/S 0.20 dan kandungan semen 150 kgPC/m³ sudut geser dalam komposit (ϕ_{uds}) minimum sebesar 4.4°. Sedangkan bilangan maksimumnya pada rasio yang sama sebesar 7.7° terjadi pada kandungan semen 200 kgPC/m³. Hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 6.13 dan Gambar 6.40 yang merupakan hasil dari semua model sampel kolom semen tanah dengan uji geser langsung pada masa perawatan 7 hari.

Pada Gambar 6.40 menunjukkan perubahan sudut geser dalam komposit dari semua sampel model kolom semen tanah pada masa perawatan 7 hari dengan uji geser langsung, dimana pada setiap variasi rasio d/S dan kandungan semen terjadi 3 sampel model kolom semen tanah. Dari Gambar 6.40 tersebut dapat dilihat bahwa sudut geser dalam komposit terjadi peningkatan akibat kenaikan rasio d/S maupun peningkatan kandungan semen. Sudut geser dalam komposit minimum 4.4° terjadi pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 150 kgPC/m³. Manakala sudut geser dalam komposit maksimum 19.9° terjadi pada rasio d/S 0.71 dengan kandungan semen 300 kgPC/m³, atau terjadi perbezaan sebesar 352%

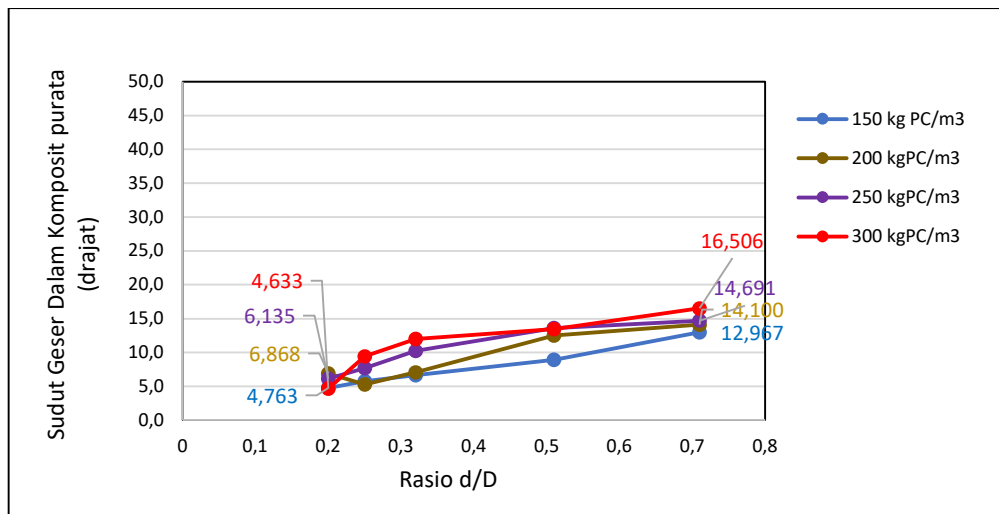
Tabel 6.13 Perubahan sudut geser dalam komposit kolom tanah semen dengan uji geser langsung masa perawatan 7 hari

No Sampel & Kod		Sudut Geser Dalam komposit (drajat) Pada Rasio d/S				
		0.2	0.25	0.32	0.51	0.71
1	D 150-7	4.379	6.088	6.394	9.366	12.003
2		4.783	5.652	5.220	7.584	11.608
3		5.129	5.561	8.303	9.767	15.290
1	D 200-7	6.637	4.435	7.246	12.703	14.568
2		6.297	5.652	6.297	12.860	13.067
3		7.668	5.771	7.680	11.850	14.665
1	D 250-7	7.618	8.410	10.980	15.551	17.321
2		5.867	6.727	11.399	12.233	13.685
3		4.919	7.882	8.298	13.073	13.067

1	D 300-7	5.050	12.156	11.514	12.463	19.948
2		4.350	6.082	14.095	13.273	13.685
3		4.498	9.989	10.394	14.686	15.885



Gambar 6.40 Perubahan sudut geser dalam komposit kolom semen tanah dengan uji geser langsung akibat variasi rasio d/S dan kandungan semen dengan masa perawatan 7 hari.



Gambar 6.41 Perubahan sudut geser dalam komposit rata-rata kolom semen tanah dengan uji geser langsung akibat variasi rasio d/S dan kandungan semen dengan masa perawatan 7 hari

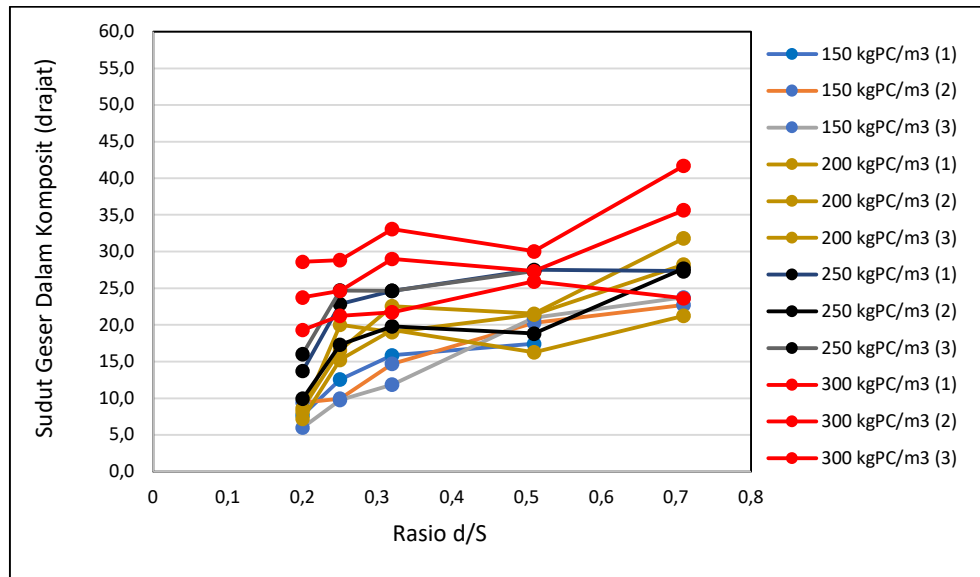
Pada Gambar 6.41 menunjukkan sudut geser dalam komposit rata-rata pada masa perawatan 7 hari dengan uji geser langsung. Sudut geser dalam komposit rata-rata pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 150 kg/m³ yaitu 4.7° meningkat menjadi 13° pada rasio d/S 0.71 atau terjadi pertambahan 176.6%. Sudut geser dalam komposit rata-rata pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 200 kg/m³ yaitu 6.9° meningkat menjadi 14.1° pada rasio d/S bertambah 0.71 atau terjadi pertambahan 104.3 %. Sudut geser dalam komposit rata-rata pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 250 kg/m³ yaitu 6.1° meningkat menjadi 14.7° pada rasio d/S bertambah 0.71 atau terjadi pertambahan 141 %. Manakala sudut geser dalam komposit rata-rata pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 300 kg/m³ yaitu 4.6° meningkat menjadi 16.5° pada rasio d/S bertambah 0.71 atau terjadi pertambahan 258.7 %. Dari Gambar 6.3.15, dapat disimpulkan bahwa kenaikan terbesar sudut gesera dalam komposit dengan uji geser langsung pada masa perawatan 7 hari terjadi pada kandungan semen semen 300 kgPC/m³, yaitu 258.7 %.

Tabel 6.14 Perubahan sudut geser dalam komposit kolom tanah semen dengan uji geser langsung masa perawatan 28 hari

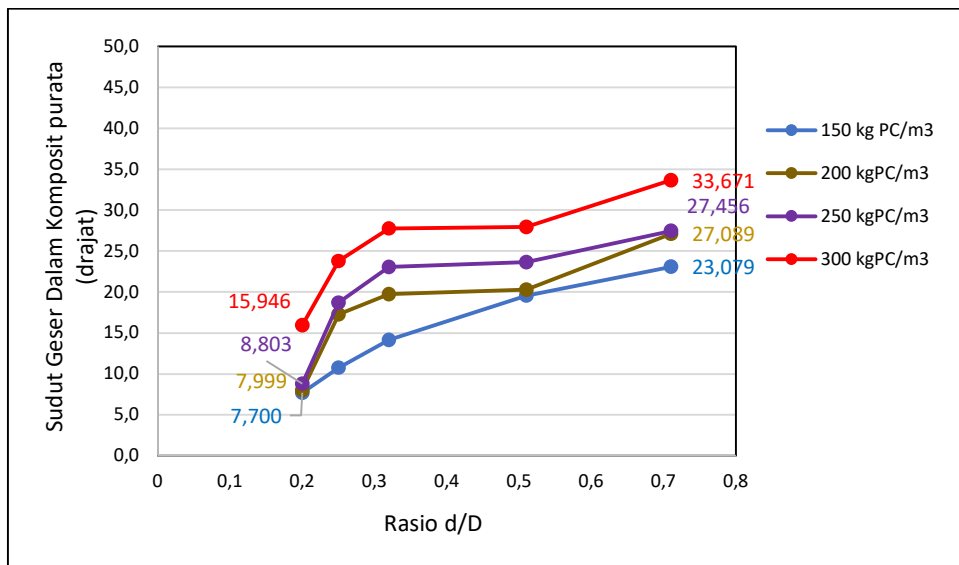
No Sampel & Kod		Sudut Geser Dalam komposit (drajat) Pada Rasio d/S				
		0.2	0.25	0.32	0.51	0.71
1	D 150-28	7.697	12.583	15.848	17.425	22.768
2		9.388	9.933	14.718	20.286	22.705
3		6.014	9.778	11.888	20.943	23.764
1	D 200-28	8.611	16.572	22.573	21.516	31.799
2		7.207	15.237	19.303	16.271	21.257
3		8.180	19.999	19.017	21.411	28.211
1	D 250-28	13.734	22.861	24.674	27.508	27.328
2		9.933	17.295	19.796	18.806	27.711
3		2.741	16.023	24.683	24.650	27.328
1	D 300-28	28.614	28.843	33.079	30.037	41.710
2		19.303	21.262	21.748	25.942	23.644
3		23.759	24.664	29.019	27.332	35.660

Pada masa perawatan 28 hari dengan rasio d/S 0.20 dan kandungan semen 250 kgPC/m³ sudut geser dalam komposit (ϕ_{cds}) minimum sebesar 2.7°. Sedangkan bilangan maksimumnya pada rasio yang sama sebesar 41.7° terjadi pada kandungan semen 300 kgPC/m³. Hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 6.14 dan Gambar 6.42 yang merupakan hasil dari semua model sampel kolom semen tanah dengan uji geser langsung pada masa perawatan 28 hari.

Pada Gambar 6.42 menunjukkan perubahan sudut geser dalam komposit dari semua sampel model kolom semen tanah pada masa perawatan 28 hari dengan uji geser langsung, dimana pada setiap variasi rasio d/S dan kandungan semen terjadi 3 sampel model kolom semen tanah. Dari Gambar 6.42 tersebut dapat dilihat bahwa sudut geser dalam komposit terjadi peningkatan akibat kenaikan rasio d/S maupun peningkatan kandungan semen. Sudut geser dalam komposit minimum 2.7° terjadi pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 250 kgPC/m³. Manakala sudut geser dalam komposit maksimum 41.7° terjadi pada rasio d/S 0.71 dengan kandungan semen 300 kgPC/m³, atau terjadi perbezaan sebesar 1444 %



Gambar 6.42 Perubahan sudut geser dalam komposit kolom semen tanah dengan uji geser langsung akibat variasi rasio d/S dan kandungan semen dengan masa perawatan 28 hari.



Gambar 6.43 Perubahan sudut geser dalam komposit rata-rata kolom semen tanah dengan uji geser langsung akibat variasi rasio d/S dan kandungan semen dengan masa perawatan 28 hari

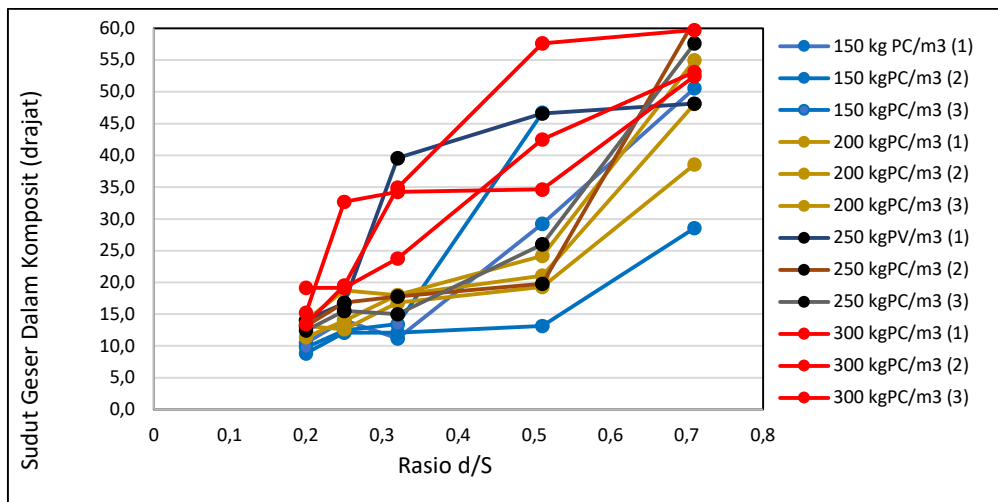
Pada Gambar 6.43 menunjukkan sudut geser dalam komposit rata-rata pada masa perawatan 28 hari dengan uji geser langsung. Sudut geser dalam komposit rata-rata pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 150 kg/m³ yaitu 7.7° meningkat menjadi 23.1° pada rasio d/S 0.71 atau terjadi pertambahan 200 %. Sudut geser dalam komposit rata-rata pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 200 kg/m³ yaitu 8° meningkat menjadi 27.1° pada rasio d/S bertambah 0.71 atau terjadi pertambahan 238.8 %. Sudut geser dalam komposit rata-rata pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 250 kg/m³ yaitu 8.8° meningkat menjadi 27.5° pada rasio d/S bertambah 0.71 atau terjadi pertambahan 212.5 %. Manakala sudut geser dalam komposit rata-rata pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 300 kg/m³ yaitu 15.9° meningkat menjadi 33.7° pada rasio d/S bertambah 0.71 atau terjadi pertambahan 111.9 %. Dari Gambar 6.43, dapat disimpulkan bahwa kenaikan terbesar sudut gesera dalam komposit dengan uji geser langsung pada masa perawatan 28 hari terjadi pada kandungan semen 200 kgPC/m³, ialah 238.8 %.

Tabel 6.15 Perubahan sudut geser dalam komposit kolom tanah semen dengan uji geser langsung masa perawatan 56 hari

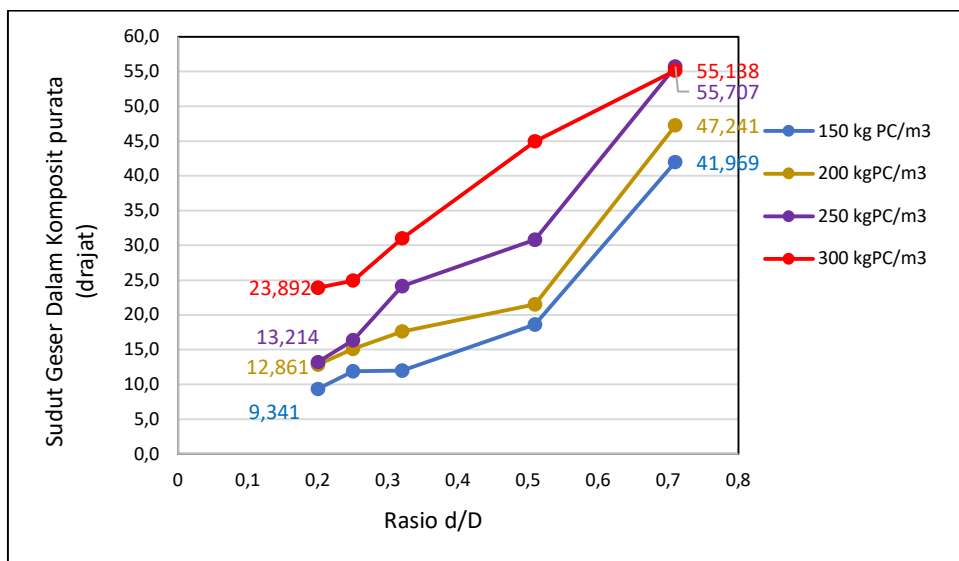
No Sampel & Kod		Sudut Geser Dalam komposit (drajat) Pada Rasio d/S				
		0.2	0.25	0.32	0.51	0.71
1	D 150-56	10.466	14.068	11.223	29.246	50.605
2		8.846	12.080	12.080	13.143	28.579
3		8.712	9.772	12.430	13.452	46.722
1	D 200-56	14.068	18.745	18.002	21.093	48.136
2		13.143	12.610	16.782	19.298	38.578
3		11.371	13.971	18.028	24.199	55.009
1	D 250-56	14.068	16.708	39.585	46.620	48.162
2		13.143	16.782	17.800	19.791	61.318
3		12.430	15.530	15.002	26.002	57.640
1	D 300-56	19.150	19.150	23.774	42.535	53.168
2		15.237	32.699	34.249	34.631	52.495
3		13.452	19.506	34.924	57.640	59.750

Pada masa perawatan 56 hari dengan rasio d/S 0.20 dan kandungan semen 150 kgPC/m³ sudut geser dalam komposit (ϕ_{cds}) minimum sebesar 8.7°. Sedangkan bilangan maksimumnya pada rasio yang sama sebesar 61.4° terjadi pada kandungan semen 300 kgPC/m³. Hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 6.15 dan Gambar 6.44 yang merupakan hasil dari semua model sampel kolom semen tanah dengan uji geser langsung pada masa perawatan 56 hari.

Pada Gambar 6.44 menunjukkan perubahan sudut geser dalam komposit dari semua sampel model kolom semen tanah pada masa perawatan 56 hari dengan uji geser langsung, dimana pada setiap variasi rasio d/S dan kandungan semen terjadi 3 sampel model kolom semen tanah. Dari Gambar 6.14 tersebut dapat dilihat bahwa sudut geser dalam komposit terjadi peningkatan akibat kenaikan rasio d/S maupun peningkatan kandungan semen. Sudut geser dalam komposit minimum 8.7° terjadi pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 150 kgPC/m³. Manakala sudut geser dalam komposit maksimum 61.3° terjadi pada rasio d/S 0.71 dengan kandungan semen 300 kgPC/m³, atau terjadi perbezaan sebesar 604.6 %



Gambar 6.44 Perubahan sudut geser dalam komposit kolom semen tanah dengan uji geser langsung akibat variasi rasio d/S dan kandungan semen dengan masa perawatan 56 hari.



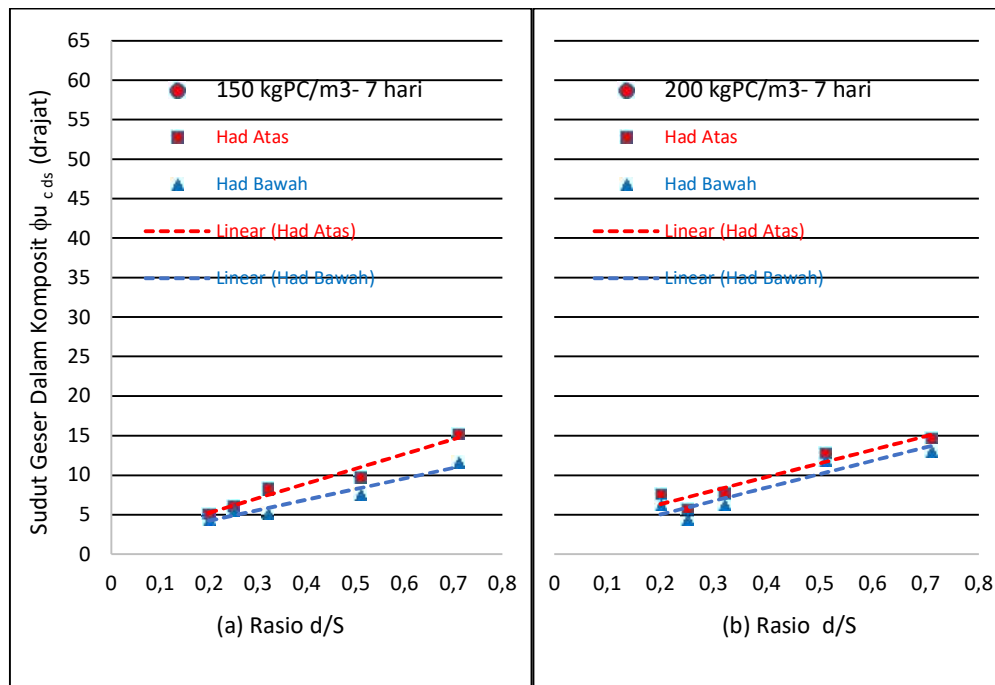
Gambar 6.45 Perubahan sudut geser dalam komposit rata-rata kolom semen tanah dengan uji geser langsung akibat variasi rasio d/S dan kandungan semen dengan masa perawatan 56 hari

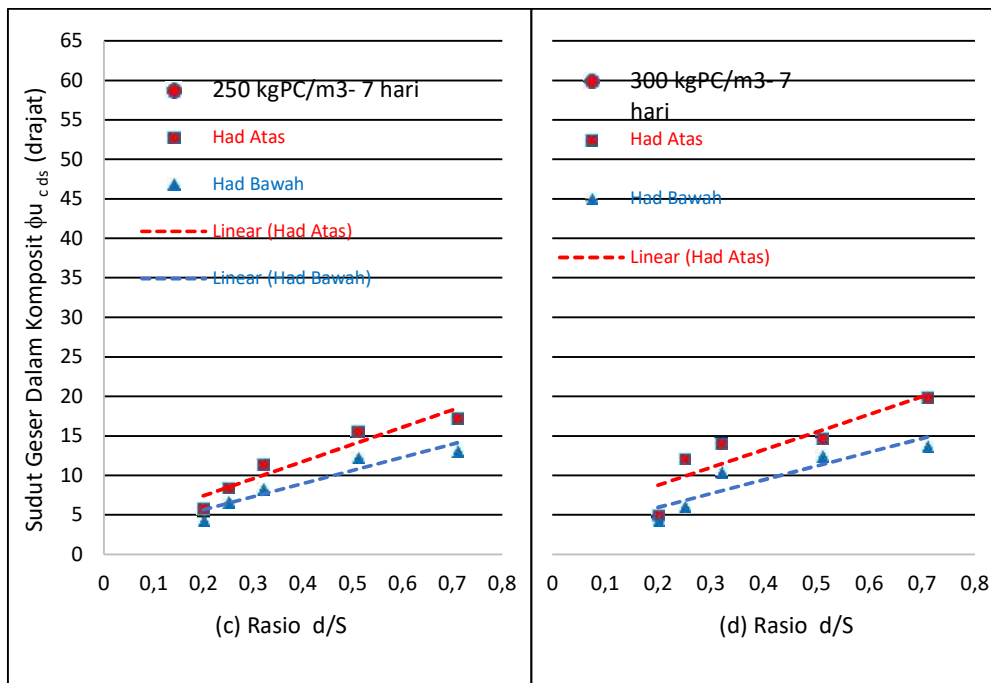
Pada Gambar 6.45 menunjukkan sudut geser dalam komposit rata-rata pada masa perawatan 56 hari dengan uji geser langsung. Sudut geser dalam komposit rata-

rata pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 150 kg/m^3 yaitu 9.3° meningkat menjadi 42° pada rasio d/S 0.71 atau terjadi pertambahan 351.6 %. Sudut geser dalam komposit rata-rata pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 200 kg/m^3 yaitu 12.9° meningkat menjadi 47.2° pada rasio d/S bertambah 0.71 atau terjadi pertambahan 265.9 %. Sudut geser dalam komposit rata-rata pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 250 kg/m^3 yaitu 13.2° meningkat menjadi 55.7° pada rasio d/S bertambah 0.71 atau terjadi pertambahan 322 %. Manakala sudut geser dalam komposit rata-rata pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 300 kg/m^3 yaitu 23.9° meningkat menjadi 55.1° pada rasio d/S bertambah 0.71 atau terjadi pertambahan 130.5%. Dari Gambar 6.45, dapat disimpulkan bahwa kenaikan terbesar sudut geser dalam komposit dengan uji geser langsung pada masa perawatan 56 hari terjadi pada kandungan semen semen 250 kgPC/m^3 , ialah 322 %.

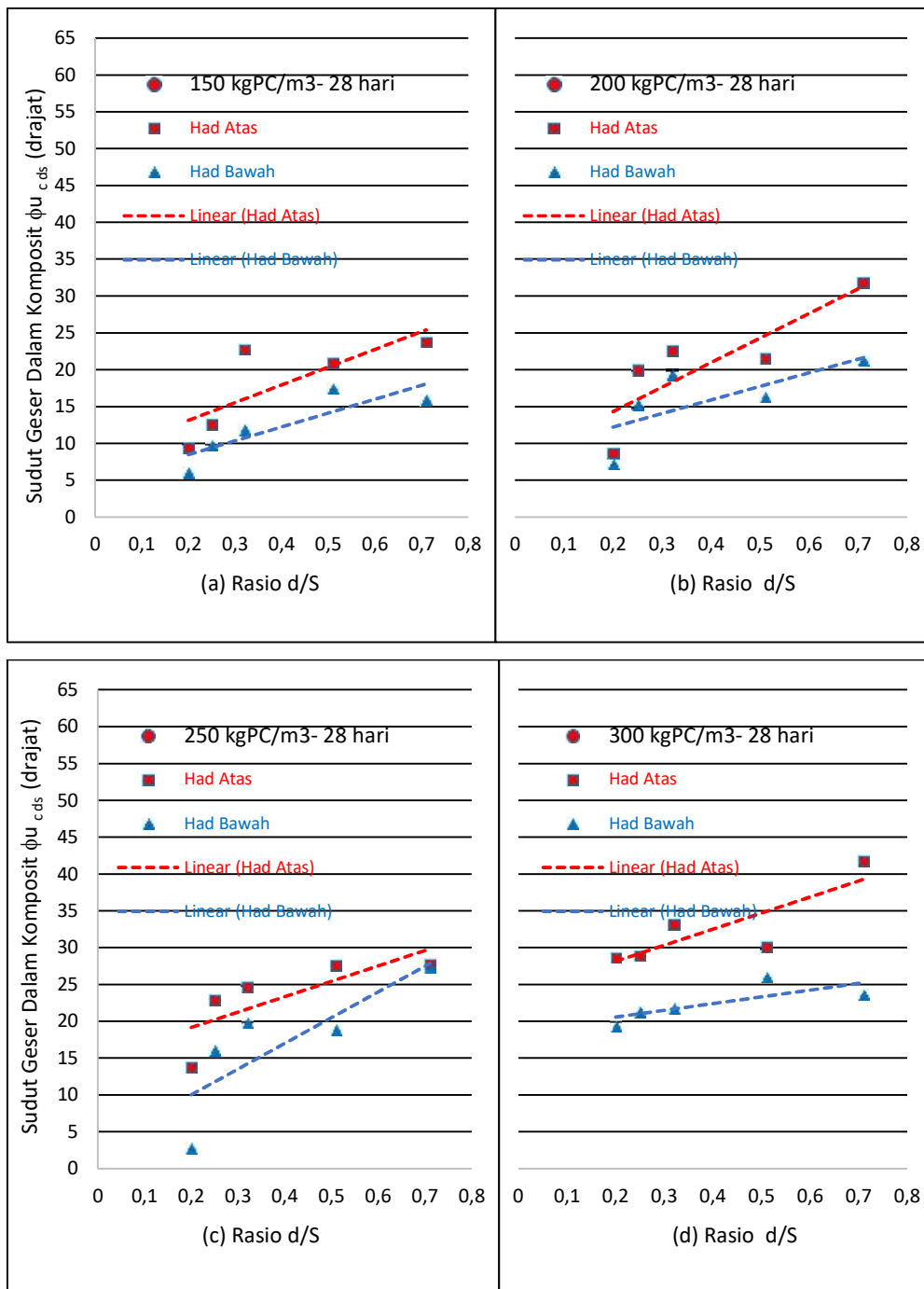
Had sudut geser dalam komposit maksimum dan minimum dari hasil uji geser langsung pada masa uji 7 hari dapat dilihat pada Gambar 6.46, dimana pada Gambar 6.46 (a) had maksimum dan had minimum sudut geser dalam komposit pada kandungan semen 150 kgPC/m^3 . Berurutan pada Gambar 6.46 (b) untuk kandungan semen 200 kg/m^3 , Gambar 6.46 (c) untuk kandungan semen 250 kg/m^3 dan pada Gambar 6.46 (d) untuk kandungan semen 300 kg/m^3 . Dari ke empat Gambar 6.46 tersebut tampak terjadinya peningkatan had sudut geser dalam komposit maksimum maupun minimumnya pada masa perawatan 7 hari dengan bertambah kandungan semen dan meningkatnya rasio d/S.

Rentang had sudut geser dalam komposit maksimum dan minimum tampak konsisten kelakukannya akibat peningkatan masa perawatan 28 hari, namun terdapat perbezaan dari skala besarnya seperti pada Gambar 6.47. Secara signifikan pula bahwa terjadinya rentang had sudut geser dalam maksimum dan minimum semakin bertambah dengan semakin besarnya rasio d/S. Hal tersebut juga terjadi pada masa perawatan 56 hari, seperti dapat dilihat pada Gambar 6.48.



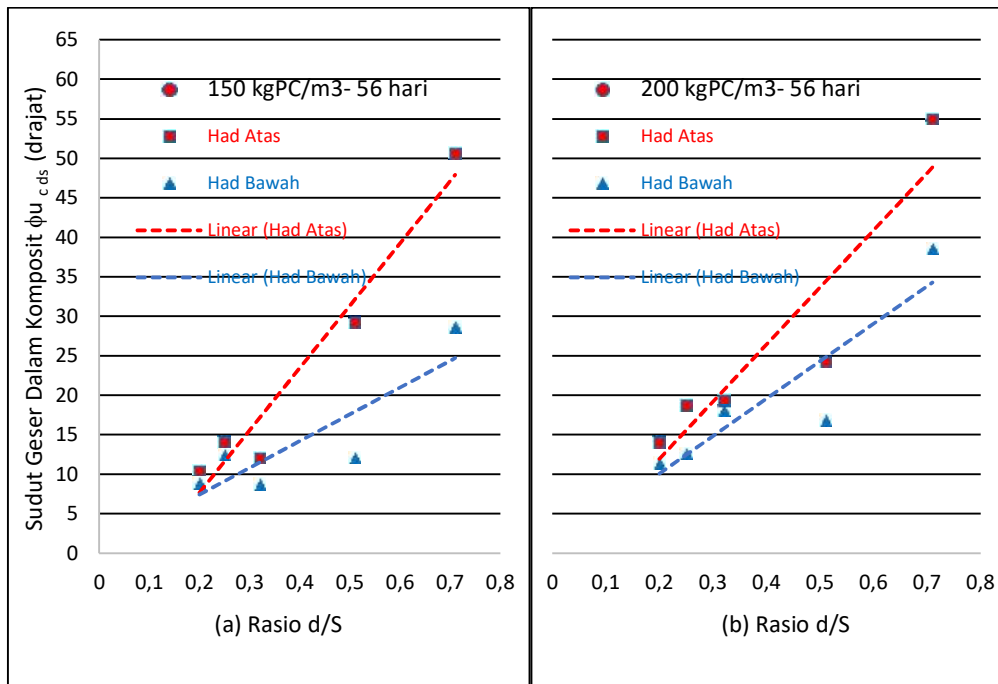


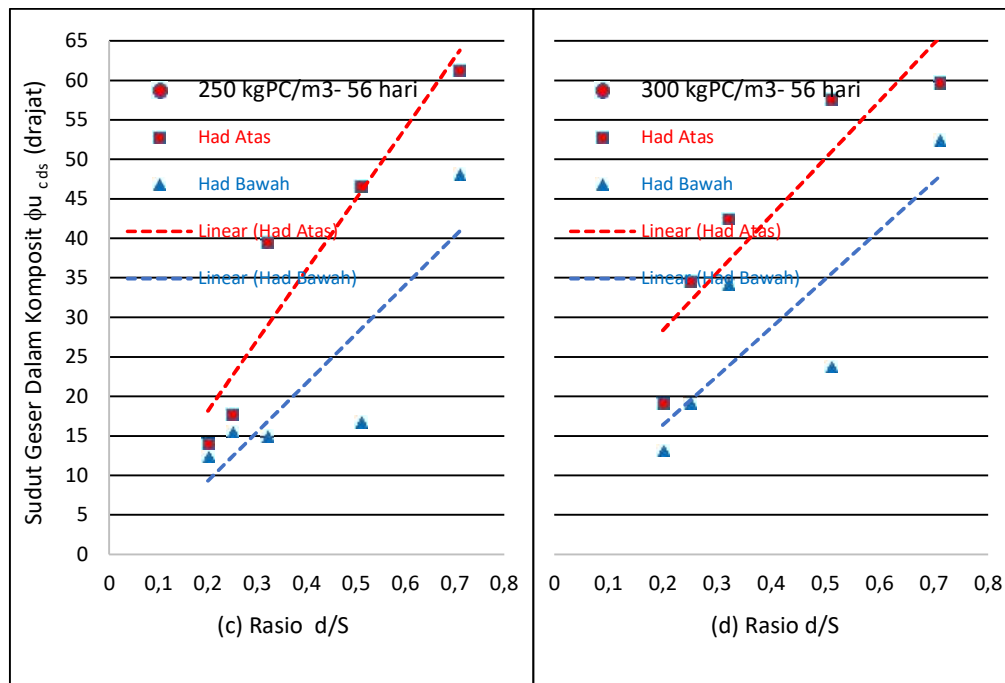
Gambar 6.46 Had atas dan had bawah sudut geser dalam komposit rata-rata kolom semen tanah terhadap Rasio d/S dan kandungan semen pada masa perawatan 7 hari, dari uji geser langsung (a) 150 kgPC/m³, (b) 200 kgPC/m³, (c) 250 kgPC/m³ dan (d) 300 kgPC/m³



Gambar 6.47 Had atas dan had bawah sudut geser dalam komposit rata-rata kolom semen tanah terhadap Rasio d/S dan kandungan semen pada masa perawatan 28 hari

dari uji geser langsung, (a) 150 kgPC/m³, (b) 200 kgPC/m³, (c) 250 kgPC/m³ dan (d) 300 kgPC/m³





Gambar 6.48 Had atas dan had bawah sudut geser dalam komposit rata-rata kolom semen tanah terhadap Rasio d/S dan kandungan semen pada masa perawatan 56 hari dari uji geser langsung, (a) 150 kgPC/m³, (b) 200 kgPC/m³, (c) 250 kgPC/m³ dan (d) 300 kgPC/m³

6.3.4 Prosentase Perubahan Sudut Geser Dalam Komposit Model Kolom Semen Tanah Dengan Uji Geser Langsung

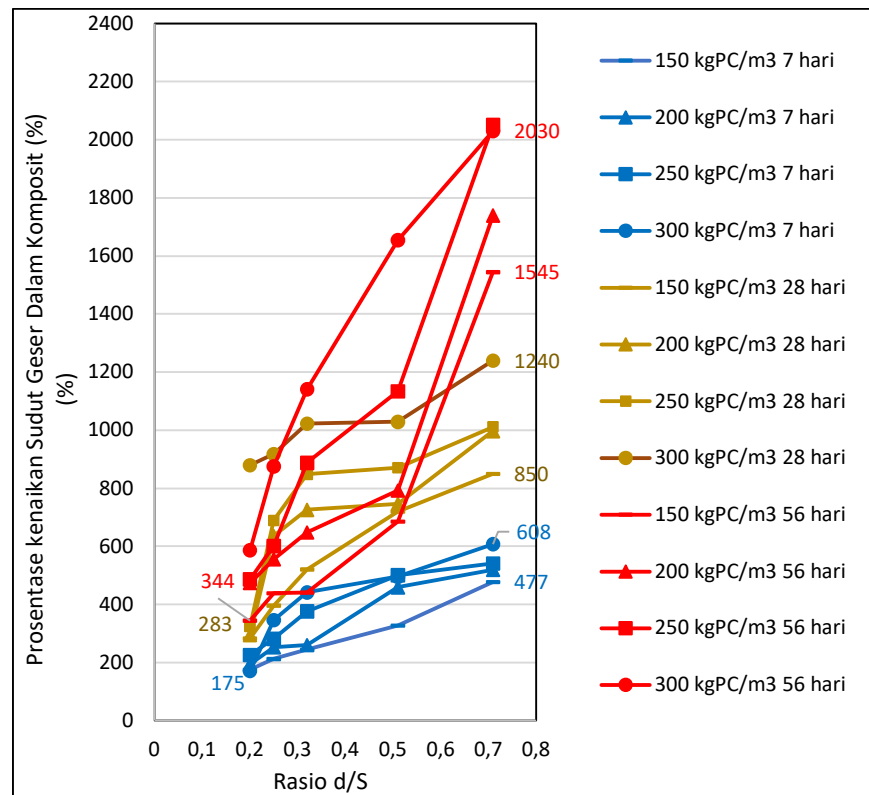
Prosentase perubahan sudut geser dalam komposit dari model kolom semen tanah dari uji geser langsung menunjukkan pertambahan akibat variasi rasio d/S , Pertambahan prosentase sudut geser dalam komposit juga terjadi dengan pertambahan masa perawatan dari 7 hari hingga 56 hari dan pertambahan kandungan semen dari 150 hingga 300 kgPC/m³, Hal tersebut dapat dilihat dari Gambar 6.49.

Prosentase pertambahan sudut geser dalam komposit dari uji geser langsung terjadi dengan merasiokan sudut geser dalam komposit dengan sudut geser dalam semula jadi uji rich langsung lempung lembut Kroya. Pada masa perawatan 7 hari,

prosentase kenaikan sudut geser dalam komposit minimum terjadi pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 150 kg/m^3 yaitu sebesar 175 %, Prosentase pertambahan sudut geser dalam komposit akan meningkat dimasa perawatan yang sama dan kandungan semen yang sama hingga 477 % bila terjadi pertambahan rasio d/S hingga 0.71. Bila kandungan semennya bertambah hingga 300 kgPC/m^3 maka prosentase pertambahan sudut geser dalam komposit akan maksimuml dan bertambah hingga 608 %.

Pada masa perawatan 28 hari, prosentase kenaikan sudut geser dalam komposit minimum terjadi pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 150 kg/m^3 yaitu sebesar 283 %, Prosentase pertambahan sudut geser dalam komposit akan meningkat hingga 850 % bila terjadi pertambahan rasio d/S hingga 0.71 pada kandungan semen yang sama. Bila kandungan semen bertambah hingga 300 kgPC/m^3 maka prosentase pertambahan sudut geser dalam komposit akan maksimuml dan bertambah hingga 1240 %.

Pada masa perawatan 56 hari, prosentase kenaikan sudut geser dalam komposit minimum terjadi pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 150 kg/m^3 yaitu sebesar 344 %, Prosentase pertambahan sudut geser dalam komposit akan meningkat hingga 1545 % bila terjadi pertambahan rasio d/S hingga 0.71 pada kandungan semen yang sama. Bila kandungan semen bertambah hingga 300 kgPC/m^3 maka prosentase pertambahan sudut geser dalam komposit akan maksimuml dan bertambah hingga 2030 %. Prosentase pertambahan sudut geser dalam komposit dari uji geser langsung dapat dilihat pada Gambar 6.49 berikut.



Gambar 6.49 Prosentase perubahan sudut geser dalam komposit model kolom semen tanah dengan uji geser langsung

6.4 Modulus Elastisitas Komposit Model Kolom Semen Lempung Lembut Kroya

Dari triaxial test model kolom semen tanah didapatkan kurva tegangan regangan dari setiap sampel dengan variasi rasio d/S, kandungan semen serta masa perawatan. Setiap satu sampel dilakukan dengan tiga tegangan keliling yang berbeda, sehingga setiap kurva dapat diperoleh modulus elastisitas (E). Modulus elastisitas yang diperoleh berupa modulus elastisitas initial komposit (E_{i_c}), modulus elastisitas sekan komposit (E_{s_c}),

Modulus elastisitas initial komposit (E_{i_c}) diperoleh dari garis kemiringan kurva pada initial tegangan regangan, yang merupakan rasio antara tegangan dengan regangan saat semula tegangan terjadi. Manakala modulus elastisitas sekan komposit

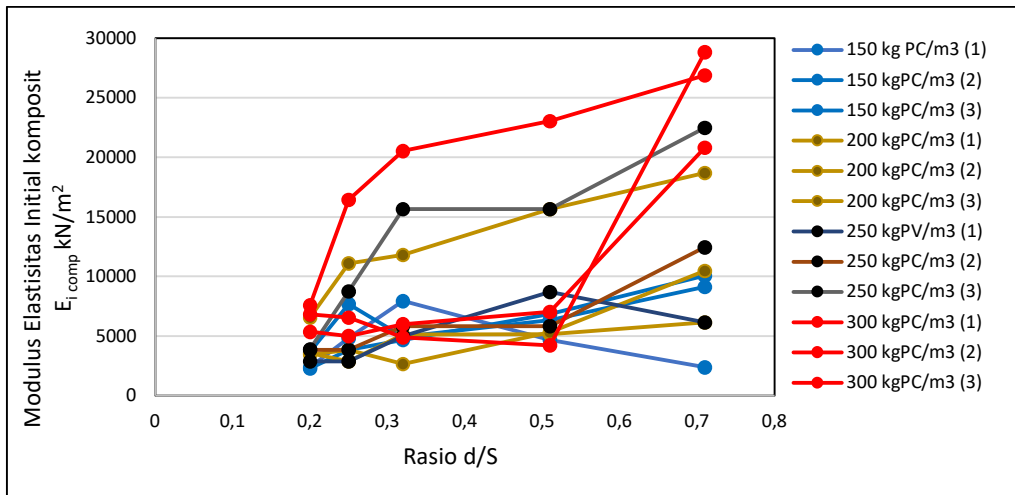
(E_{sc}) adalah garis kemiringan kurva yang diperoleh dari titik awal tegangan semula menuju tegangan maksimuml pada kurva, dan merupakan rasio antara tegangan maksimuml dengan regangan saat tegangan maksimuml terjadi.

6.4.1. Modulus Elastisitas Initial Komposit (E_{ic})

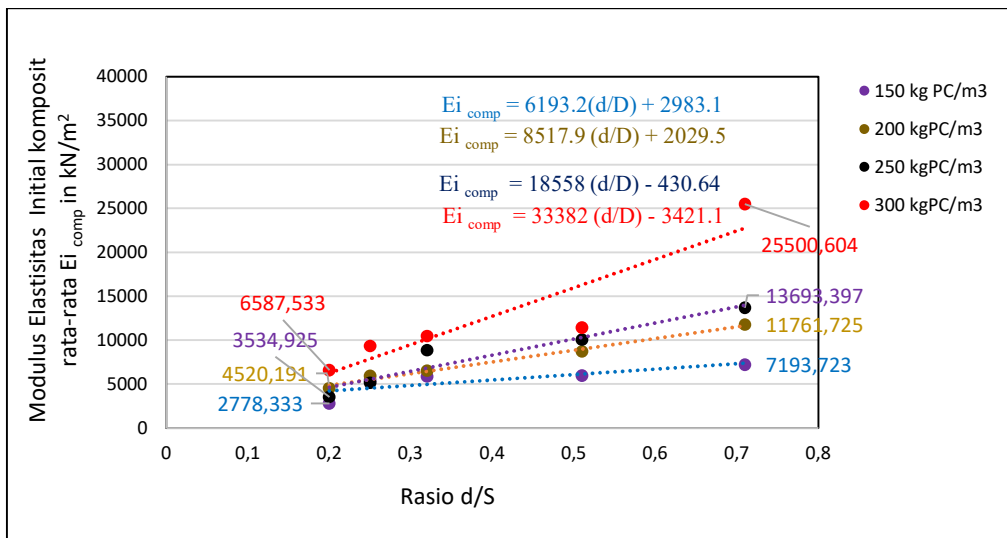
Modulus elastisitas initial komposit dari semua sampel model kolom semen tanah dengan triaxial test pada masa perawatan 7 hari dapat dilihat pada Gambar 6.50. Modulus elastisitas initial komposit rata-rata dan persamaan modulus elastisitas initial komposit dengan fungsi dari rasio d/S pada masa perawatan 7 hari dapat dilihat pada Gambar 6.51.

Pada masa perawatan 7 hari dengan kandungan semen 150 kgPC/m^3 , modulus elastisitas initial komposit pada rasio 0.20 sebesar 2778 N/m^2 menjadi sebesar 7193 kN/m^2 pada rasio d/S 0.71, atau terjadi pertambahan sebesar 158.9% . Sementara pada kandungan semen 200 kgPC/m^3 , modulus elastisitas initial komposit pada rasio 0.20 sebesar 4520 kN/m^2 menjadi sebesar 11761 kN/m^2 pada rasio d/S 0.71, atau terjadi pertambahan sebesar 160.2 %. Pada kandungan semen 250 kgPC/m^3 , modulus elastisitas initial komposit pada rasio 0.20 sebesar 3453 kN/m^2 menjadi sebesar 13693 kN/m^2 pada rasio d/S 0.71, atau terjadi pertambahan sebesar 296.6 %. Manakala pada kandungan semen 300 kgPC/m^3 , modulus elastisitas initial komposit pada rasio 0.20 sebesar 6587 kN/m^2 menjadi sebesar 25500 kN/m^2 pada rasio d/S 0.71, atau terjadi pertambahan sebesar 287.1 %. Dapat disimpulkan bahwa pada masa perawatan 7 hari pertambahan modulus elastisitas initial komposit yang maksimuml terjadi pada kandungan semen 250 kgPC/m^3 , sebesar 296.6 %. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 6.51.

Empat persamaan modulus elastisitas initial komposit (E_{icomp}) yang merupakan fungsi rasio jarak d/S diperoleh dari persemaan linear dari Gambar 6.51. Persamaan tersebut terjadi pada masa perawatan sampel 7 hari, dan setiap persamaan terjadi pada setiap masing-masing kandungan semen.



Gambar 6.50 Modulus elastisitas initial komposit dari triaxial test kolom semen tanah dengan variasi rasio d/S dan kandungan semen, masa perawatan 7 hari.

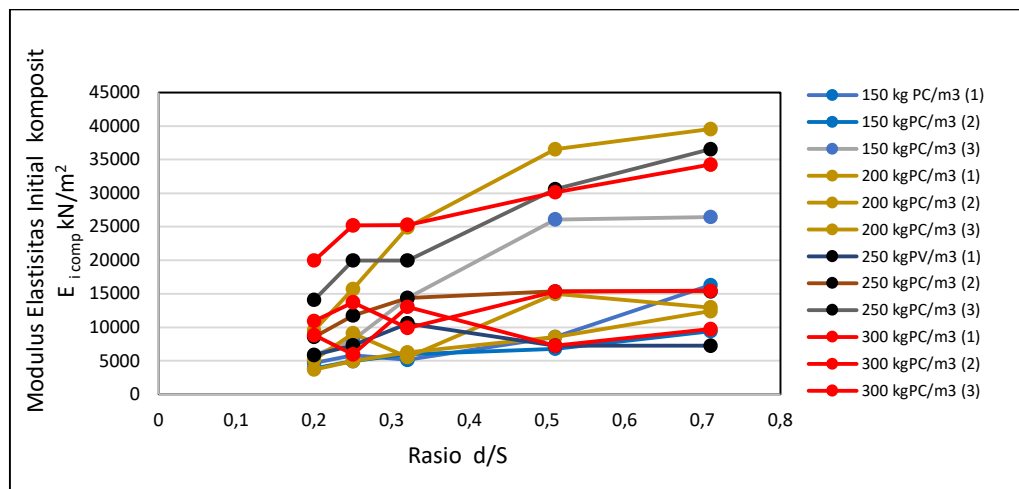


Gambar 6.51 Modulus elastisitas initial rata-rata komposit dari triaxial test kolom semen tanah dengan variasi rasio d/S dan kandungan semen, masa perawatan 7 hari.

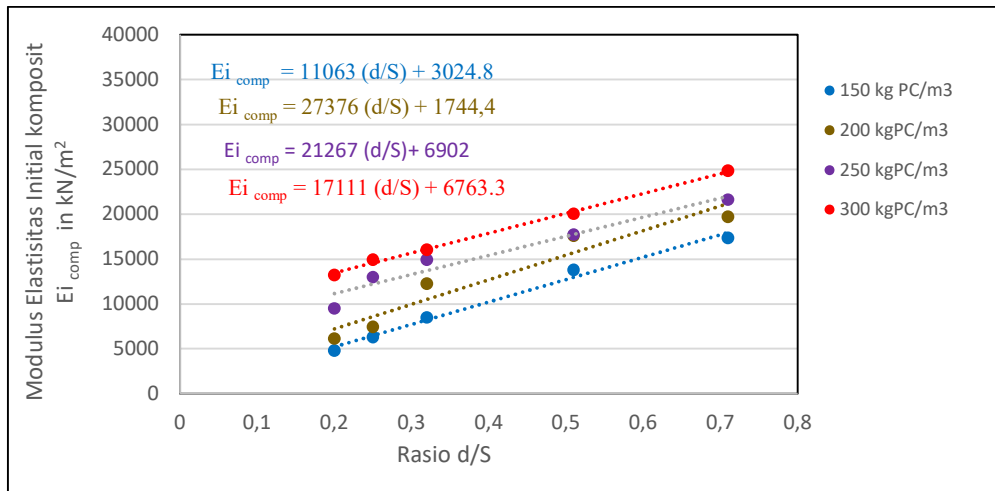
Modulus elastisitas initial komposit dari semua sampel model kolom semen tanah dengan triaxial test pada masa perawatan 28 hari dapat dilihat pada Gambar 6.52. Modulus elastisitas initial komposit rata-rata dan persamaan modulus elastisitas

initial komposit dengan fungsi dari rasio d/S pada masa perawatan 28 hari dapat dilihat pada Gambar 6.53

Pada masa perawatan 28 hari dengan kandungan semen 150 kgPC/m³, modulus elastisitas initial komposit pada rasio 0.20 sebesar 4807 kN/m² menjadi sebesar 17384 kN/m² pada rasio d/S 0.71, atau terjadi penambahan sebesar 261.6%, Sementara pada kandungan semen 200 kgPC/m³, modulus elastisitas initial komposit pada rasio 0.20 sebesar 6150 kN/m² menjadi sebesar 21641 kN/m² pada rasio d/S 0.71, atau terjadi penambahan sebesar 251.9 %. Pada kandungan semen 250 kgPC/m³, modulus elastisitas initial komposit pada rasio 0.20 sebesar 9506 kN/m² menjadi sebesar 19733 kN/m² pada rasio d/S 0.71, atau terjadi penambahan sebesar 107.6 %. Manakala pada kandungan semen 300 kgPC/m³, modulus elastisitas initial komposit pada rasio 0.20 sebesar 13256 kN/m² menjadi sebesar 19819 kN/m² pada rasio d/S 0.71, atau terjadi penambahan sebesar 49.6 %. Dapat disimpulkan bahwa pada masa perawatan 28 hari penambahan modulus elastisitas initial komposit yang maksimuml terjadi pada kandungan semen 150 kgPC/m³, sebesar 261.9 %. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 6.53 berikut.



Gambar 6.52 Modulus elastisitas initial komposit dari triaxial test kolom semen tanah dengan variasi rasio d/S dan kandungan semen, masa perawatan 28 hari.

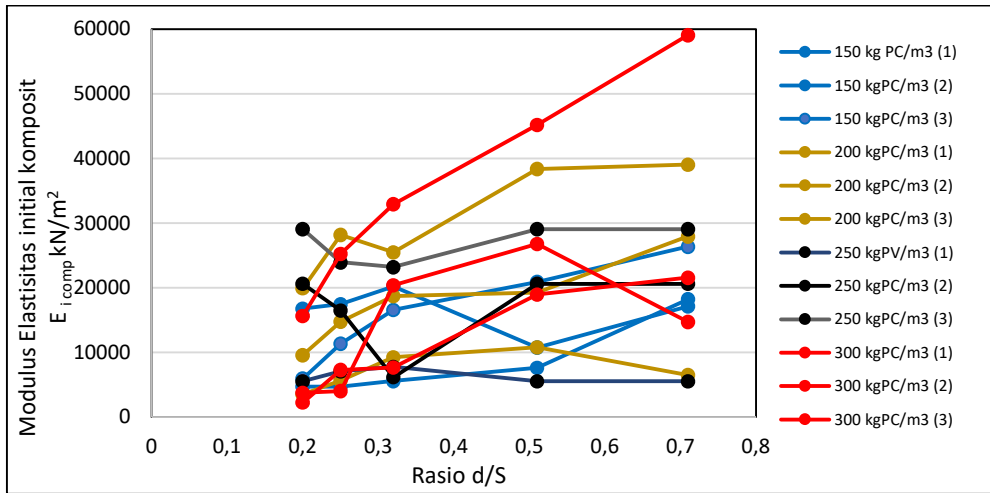


Gambar 6.53 Modulus elastisitas initial rata-rata komposit dari triaxial test kolom semen tanah dengan variasi rasio d/S dan kandungan semen, masa perawatan 28 hari

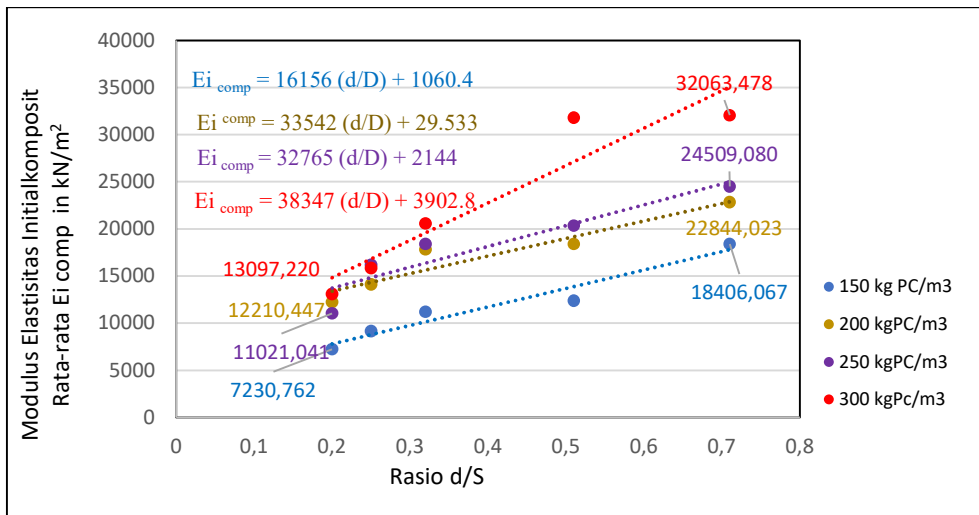
Modulus elastisitas initial komposit dari semua sampel model kolom semen tanah dengan triaxial test pada masa perawatan 56 hari dapat dilihat pada Gambar 6.4.5. Manakala modulus elastisitas initial komposit rata-rata dan persamaan modulus elastisitas initial komposit dengan fungsi dari rasio d/S pada masa perawatan 56 hari dapat dilihat pada Gambar 6.4.6.

Pada masa perawatan 56 hari dengan kandungan semen 150 kgPC/m³, modulus elastisitas initial komposit pada rasio 0.20 sebesar 7230 kN/m² menjadi sebesar 18406 kN/m² pada rasio d/S 0.71, atau terjadi pertambahan sebesar 154.6 %, Sementara pada kandungan semen 200 kgPC/m³, modulus elastisitas initial komposit pada rasio 0.20 sebesar 12210 kN/m² menjadi sebesar 22844 kN/m² pada rasio d/S 0.71, atau terjadi pertambahan sebesar 87.1 %. Pada kandungan semen 250 kgPC/m³, modulus elastisitas initial komposit pada rasio 0.20 sebesar 11021kN/m² menjadi sebesar 24509 kN/m² pada rasio d/S 0.71, atau terjadi pertambahan sebesar 122.4 %. Manakala pada kandungan semen 300 kgPC/m³, modulus elastisitas initial komposit pada rasio 0.20 sebesar 15839 kN/m² menjadi sebesar 30307 kN/m² pada rasio d/S 0.71, atau terjadi pertambahan sebesar 91.34 %. Dapat disimpulkan bahwa pada masa perawatan 56 hari pertambahan modulus elastisitas initial komposit yang maksimuml

terjadi pada kandungan semen 150 kgPC/m³, sebesar 154.6 %. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 6.4.6 berikut.



Gambar 6.54 Modulus elastisitas initial komposit dari triaxial test kolom semen tanah dengan variasi rasio d/S dan kandungan semen, masa perawatan 56 hari.

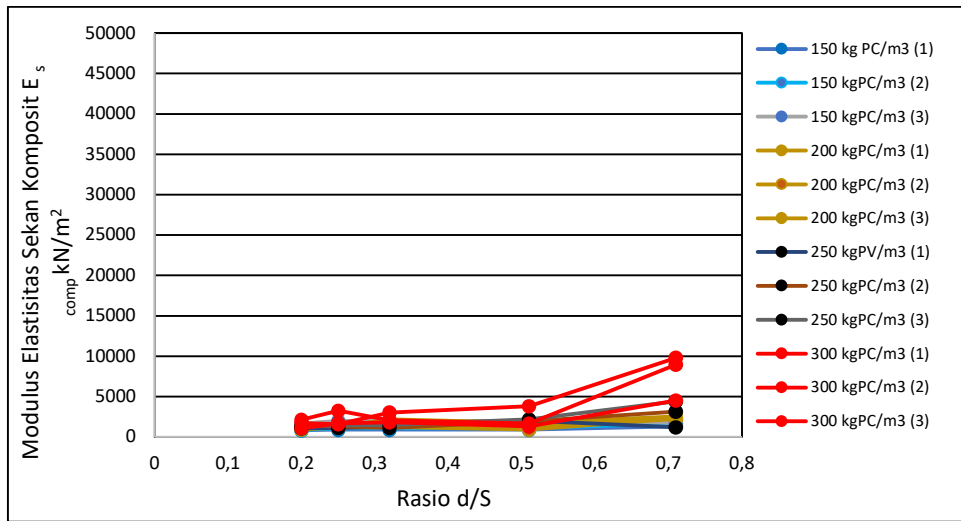


Gambar 6.55 Modulus elastisitas initial rata-rata komposit dari triaxial test kolom semen tanah dengan variasi rasio d/S dan kandungan semen, masa perawatan 56 hari

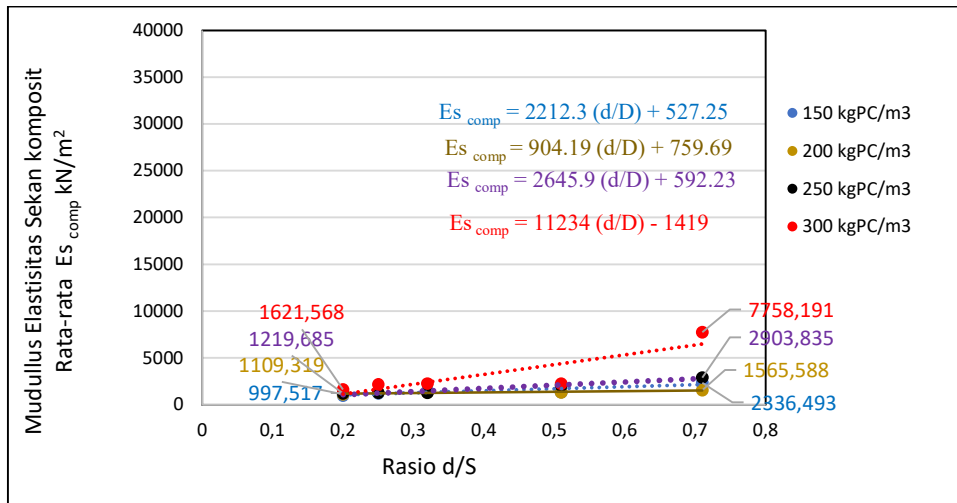
6.4.2 Modulus Elastisitas Sekan Komposit ($E_{s \text{ comp}}$)

Modulus elastisitas sekan komposit dari semua sampel model kolom semen tanah dengan triaxial test pada masa perawatan 7 hari dapat dilihat pada Gambar 6.56. Manakala modulus elastisitas sekan komposit rata-rata dan persamaan modulus elastisitas sekan komposit dengan fungsi dari rasio d/S pada masa perawatan 7 hari dapat dilihat pada Gambar 6.7. Dapat dilihat bahwa modulus awal sekan umumnya lebih kecil dari pada modulus elastisitas initial. Secara keseluruhan perbezaan modulus awal initial dengan modulus elastisitas sekan dari triaxial test pada model sampel kolom semen tanah dapat dilihat pada Gambar 6.62.

Pada masa perawatan 7 hari dengan kandungan semen 150 kgPC/m^3 , modulus elastisitas sekan komposit pada rasio 0.20 sebesar 997 kN/m^2 menjadi sebesar 2336 kN/m^2 pada rasio d/S 0.71, atau terjadi pertambahan sebesar 134.3 %. Sementara pada kandungan semen 200 kgPC/m^3 , modulus elastisitas sekan komposit pada rasio 0.20 sebesar 1109 kN/m^2 menjadi sebesar 1565 kN/m^2 pada rasio d/S 0.71, atau terjadi pertambahan sebesar 41.1 %. Pada kandungan semen 250 kgPC/m^3 , modulus elastisitas sekan komposit pada rasio 0.20 sebesar 1219 kN/m^2 menjadi sebesar 2903 kN/m^2 pada rasio d/S 0.71, atau terjadi pertambahan sebesar 138.1 %. Manakala pada kandungan semen 300 kgPC/m^3 , modulus elastisitas sekan komposit pada rasio 0.20 sebesar 1621 kN/m^2 menjadi sebesar 7758 kN/m^2 pada rasio d/S 0.71, atau terjadi pertambahan sebesar 378.6 %. Dapat disimpulkan bahwa pada masa perawatan 7 hari pertambahan modulus elastisitas sekan komposit yang maksimum terjadi pada kandungan semen 300 kgPC/m^3 , sebesar 378.6 %. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 6.57 berikut.



Gambar 6.56 Mudullus elastisitas sekan komposit dari triaxial test kolom semen tanah dengan variasi rasio d/S dan kandungan semen, masa perawatan 7 hari

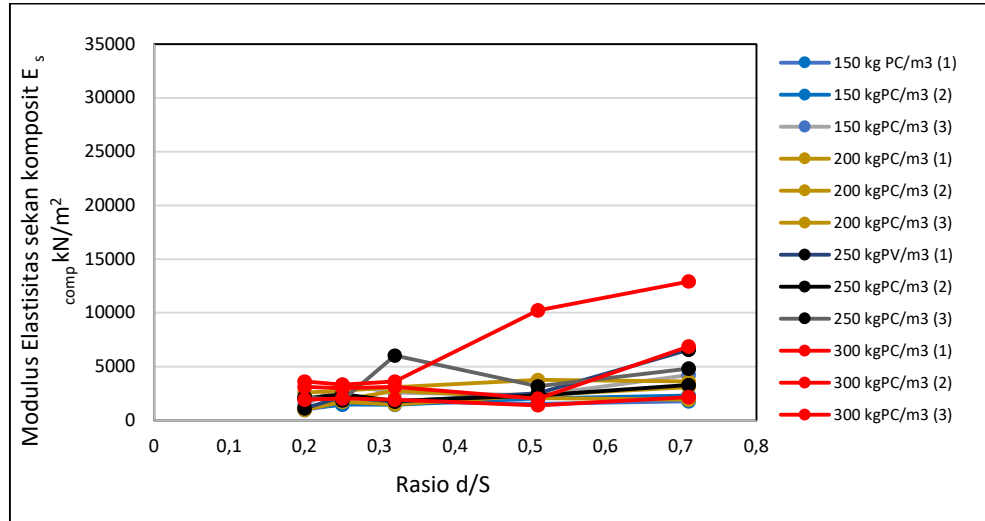


Gambar 6.57 Modulus elastisitas sekan rata-rata komposit dari triaxial test kolom semen tanah dengan variasi rasio d/S dan kandungan semen, masa perawatan 7 hari

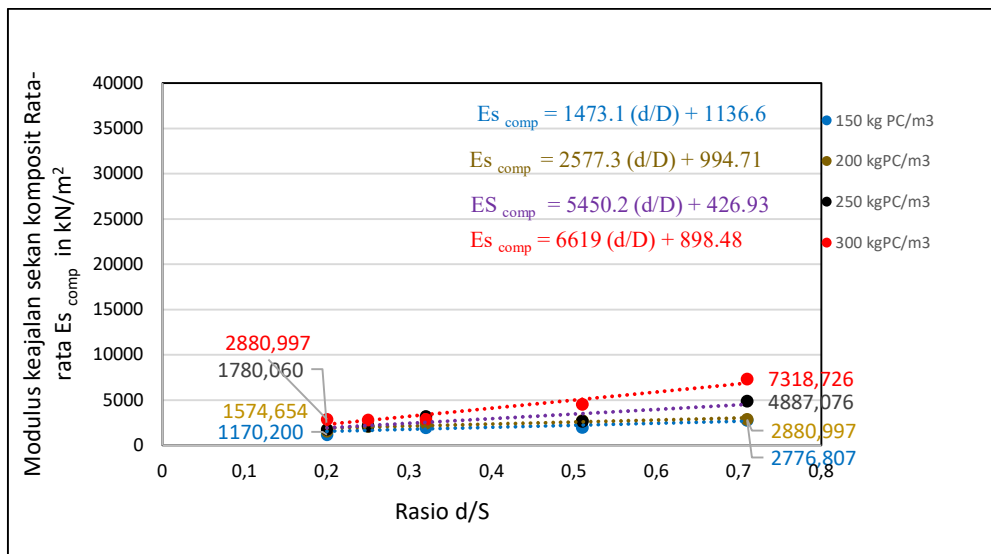
Perubahan modulus elastisitas sekan komposit dari semua sampel model kolom semen tanah dengan triaxial test pada masa perawatan 28 hari dapat dilihat pada Gambar 6.58 Manakala modulus elastisitas sekan komposit rata-rata dan persamaan

modulus elastisitas sekan komposit dengan fungsi dari rasio d/S pada masa perawatan 28 hari dapat dilihat pada Gambar 6.59.

Pada masa perawatan 28 hari dengan kandungan semen 150 kgPC/m³, modulus elastisitas sekan komposit pada rasio 0.20 sebesar 1170 kN/m² menjadi sebesar 2776 kN/m² pada rasio d/S 0.71, atau terjadi pertambahan sebesar 137.4 %. Sementara pada kandungan semen 200 kgPC/m³, modulus elastisitas sekan komposit pada rasio 0.20 sebesar 1574 kN/m² menjadi sebesar 2880 kN/m² pada rasio d/S 0.71, atau terjadi pertambahan sebesar 83 %. Pada kandungan semen 250 kgPC/m³, modulus elastisitas sekan komposit pada rasio 0.20 sebesar 1780 kN/m² menjadi sebesar 4887 kN/m² pada rasio d/S 0.71, atau terjadi pertambahan sebesar 174.6 %. Manakala pada kandungan semen 300 kgPC/m³, modulus elastisitas sekan komposit pada rasio 0.20 sebesar 2880 kN/m² menjadi sebesar 73188 kN/m² pada rasio d/S 0.71, atau terjadi pertambahan sebesar 154.1 %. Dapat disimpulkan bahwa pada masa perawatan 28 hari pertambahan modulus elastisitas sekan komposit yang maksimuml terjadi pada kandungan semen 250 kgPC/m³, sebesar 174.6 %. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 6.59 berikut.



Gambar 6.58 Modulus elastisitas sekan komposit dari triaxial test kolom semen tanah dengan variasi rasio d/S dan kandungan semen, masa perawatan 28 hari

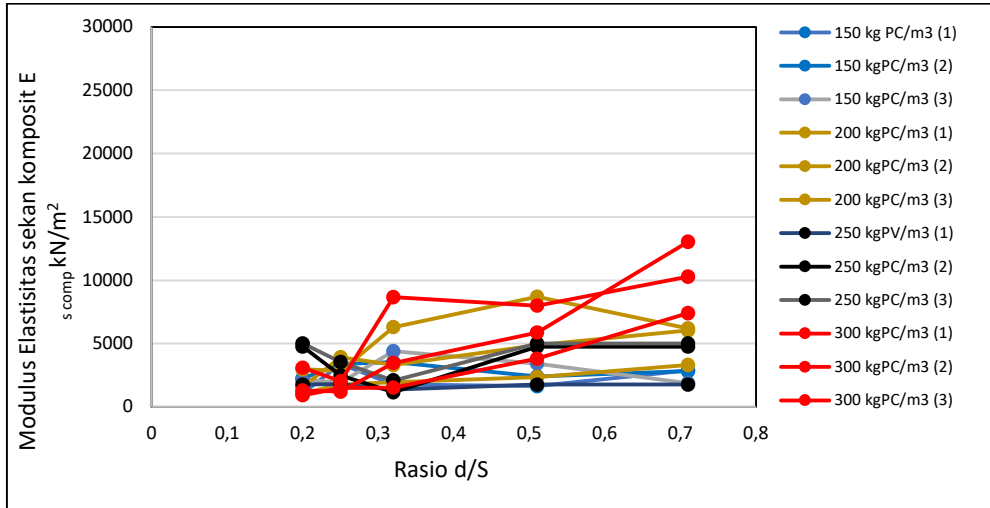


Gambar 6.59 Modulus Elastisitas sekan rata-rata komposit dari triaxial test kolom semen tanah dengan variasi rasio d/S dan kandungan semen, masa perawatan 28 hari

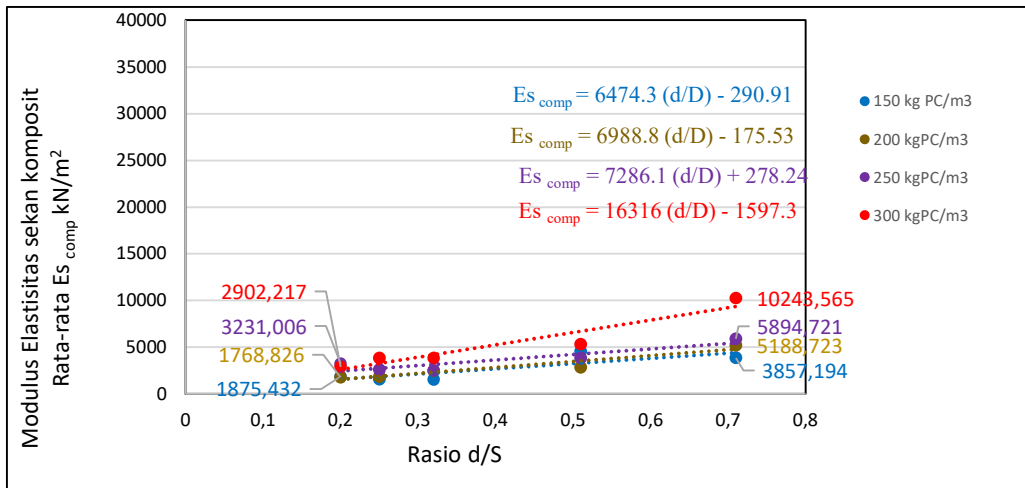
Perubahan pada modulus elastisitas sekan komposit dari semua sampel model kolom semen tanah dengan triaxial test pada masa perawatan 56 hari dapat dilihat pada Gambar 6.61. Manakala modulus elastisitas sekan komposit rata-rata dan persamaan modulus elastisitas sekan komposit dengan fungsi dari rasio d/S pada masa perawatan 28 hari dapat dilihat pada Gambar 6.62.

Pada masa perawatan 56 hari dengan kandungan semen 150 kgPC/m³, modulus elastisitas sekan komposit pada rasio 0.20 sebesar 1875 kN/m² menjadi sebesar 3857 kN/m² pada rasio d/S 0.71, atau terjadi pertambahan sebesar 105.7 %. Sementara pada kandungan semen 200 kgPC/m³, modulus elastisitas sekan komposit pada rasio 0.20 sebesar 1768 kN/m² menjadi sebesar 5188 kN/m² pada rasio d/S 0.71, atau terjadi pertambahan sebesar 193.4 %. Pada kandungan semen 250 kgPC/m³, modulus elastisitas sekan komposit pada rasio 0.20 sebesar 3231 kN/m² menjadi sebesar 5894 kN/m² pada rasio d/S 0.71, atau terjadi pertambahan sebesar 82.4 %. Manakala pada kandungan semen 300 kgPC/m³, modulus elastisitas sekan komposit pada rasio 0.20 sebesar 2902 kN/m² menjadi sebesar 10248 kN/m² pada rasio d/S 0.71, atau terjadi pertambahan sebesar 253.1 %. Dapat disimpulkan bahwa pada masa perawatan 56 hari pertambahan modulus elastisitas sekan komposit yang maksimuml

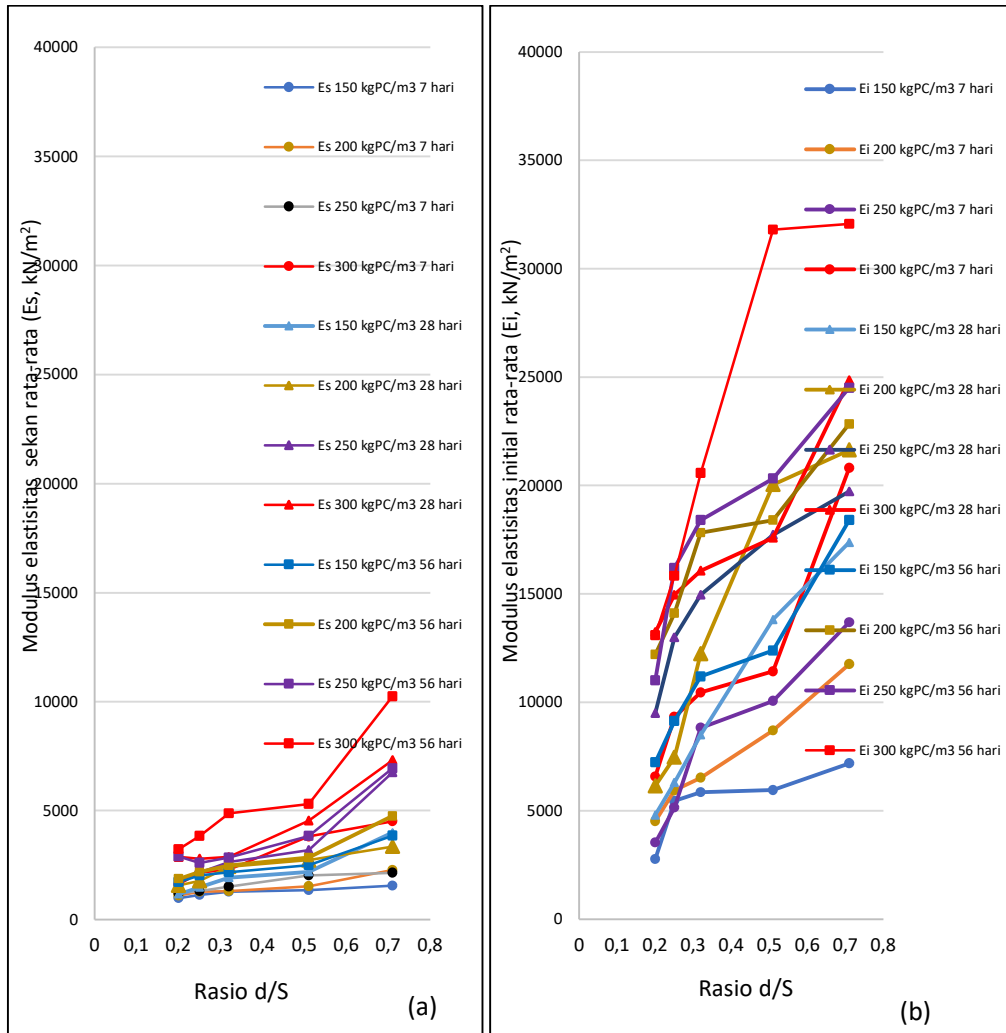
terjadi pada kandungan semen 300 kgPC/m³, sebesar 253.1 %. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 6.4.61 berikut.



Gambar 6.60 Modulus elastisitas sekan komposit dari triaxial test taing semen tanah dengan variasi rasio d/S dan kandungan semen, masa perawatan 56 hari



Gambar 6.61 Modulus elastisitas sekan rata-rata komposit dari triaxial test kolom semen tanah dengan variasi rasio d/S dan kandungan semen, masa perawatan 28 hari



Gambar 6.62 (a) Modulus elastisitas sekan rata-rata komposit dan (b) modulus elastisitas tangan semula komposit dari triaxial test model sampel kolom semen tanah pada variasi masa perawatan, rasio d/S dan kandungan semen.

BAB 7

BAB 4 KORELASI PARAMETER LEMPUNG LEMBUT DENGAN PARAMETER LEMPUNG KOMPOSIT DALAM KESTABILAN PENAMBAHBAIKAN CERUN

7.1 Pendahuluan

Di dalam rekabentuk timbunan yang memerlukan penambahbaikan menggunakan metoda kolom semen tanah, parameter yang diperlukan oleh mekanik lempung komposit adalah kekuatan geser komposit dan modulus elastisitas komposit. Magnitud kohesi komposit dan sudut geser dalam komposit serta modulus elastisitas komposit dapat dikira melalui metoda model sampel kolom semen tanah. Terlebih dahulu perlu ditetapkan rasio d/S dan kandungan semen yang akan dilakukan di dalam pembinaan rekabentuk penambahbaikan tanah.

Korelasi diantara rasio kohesi kolom semen tanah dan kohesi tanah asal dengan kohesi komposit pada rasio d/S dan kandungan semen tertentu diperlukan untuk memperolehi kohesi komposit. Begitu juga dengan korelasi diantara rasio sudut geser dalam kolom semen tanah dan sudut geser dalam tanah asal, sudut geser dalam komposit pada rasio d/S dan kandungan semen tertentu diperlukan untuk memperolehi sudut geser dalam komposit. Hal yang sama juga dilakukan untuk memperolehi modulus elastisitas komposit.

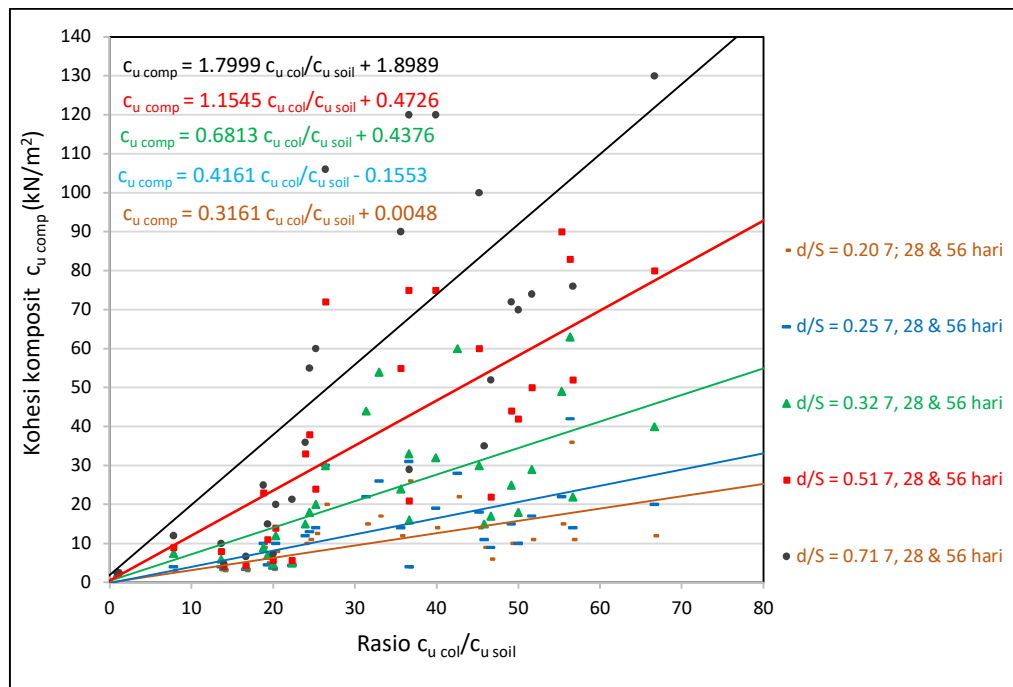
7.2 Korelasi Kekuatan Geser Komposit

Untuk keperluan analisis kestabilan cerun dengan menggunakan penambahbaikan menggunakan kolom semen tanah, parameter kekuatan geser komposit dari material lempung semula jadi dengan kolom semen tanah sangat diperlukan untuk analisis geoteknik. Kohesi komposit dan sudut geser dalam komposit dapat ditentukan melalui hubungan dengan rasio kekuatan geser kolom semen dengan kekuatan geser lempung asal pada rasio d/S tertentu.

7.2.1 Korelasi Kohesi Komposit

Kohesi komposit kolom semen tanah ($c_{u \text{ comp}}$) dapat ditentukan melalui rasio kohesi semen lempung ($c_{u \text{ col}}$) dengan kohesi lempung lembut asal ($c_{u \text{ soil}}$) melalui 5 persamaan yang terdapat pada Gambar 7.1. Setiap persamaan diperoleh dari rasio d/S yang berbeda. Semakin besar rasio d/S yang digunakan, serta semakin bertambahnya rasio kohesi semen lempung ($c_{u \text{ col}}$) dengan kohesi lempung lembut asal ($c_{u \text{ soil}}$), maka semakin besar nilai kohesi komposit kolom semen tanah. Semua persamaan kohesi komposit kolom semen tanah terhadap rasio kohesi semen lempung ($c_{u \text{ col}}$) dengan kohesi lempung lembut asal ($c_{u \text{ soil}}$) dapat dilihat Pada Tabel 7.1 berikut.

Kesimpulannya bahwa untuk memperoleh kohesi komposit kolom semen tanah, perlu ditentukan dahulu rasio antara kohesi campuran lempung lembut semen dengan kohesi lempung lembut semua jadi. Dengan menetapkan terlebih dahulu rasio d/S yang akan digunakan, maka dapat ditentukan kohesi komposit kolom semen tanah melalui persamaan pada Gambar 7.1, atau dapat menggunakan Tabel 7.1.



Gambar 7.1 Korelasi antara koheisi komposit ($c_{u \text{ comp}}$) kolom semen tanah dengan rasio koheisi lempung semen dengan koheisi lempung lembut semula jadi ($c_{u \text{ col}} / c_{u \text{ soil}}$).

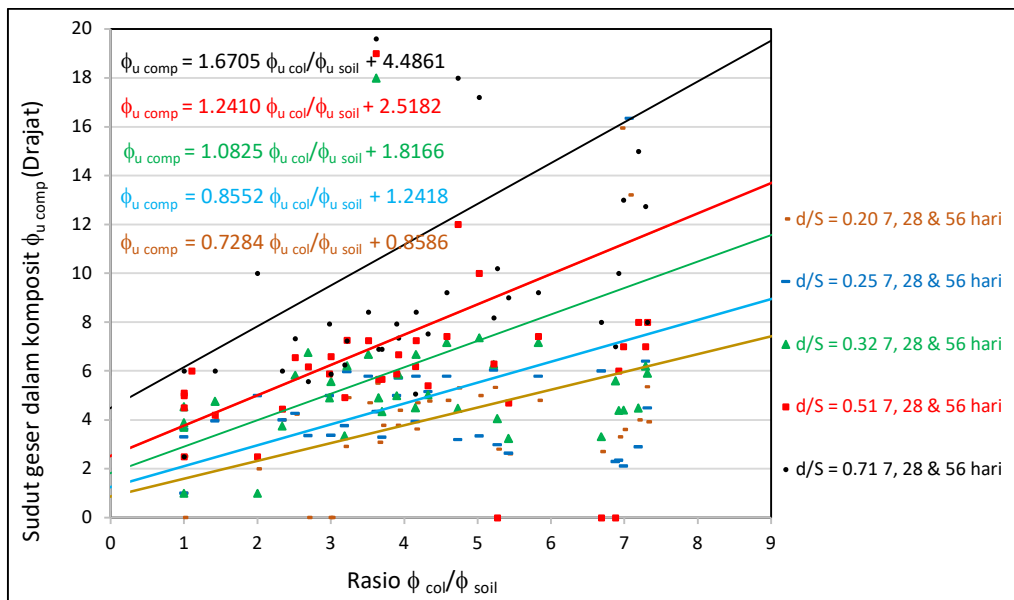
Tabel 7.1 Persamaan koheisi komposit kolom semen tanah fungsi dari rasio $c_{u \text{ col}} / c_{u \text{ soil}}$

Bil	Persamaan koheisi komposit kolom semen tanah ($c_{u \text{ comp}}$)	Rasio d/S
1	$c_{u \text{ comp}} = 0.3161 c_{u \text{ col}} / c_{u \text{ soil}} + 0.0048$	0.20

2	$c_{u \text{ comp}} = 0.4161 c_{u \text{ col}}/c_{u \text{ soil}} - 0.1553$	0.25
3	$c_{u \text{ comp}} = 0.6813 c_{u \text{ col}}/c_{u \text{ soil}} + 0.4376$	0.32
4	$c_{u \text{ comp}} = 1.1545 c_{u \text{ col}}/c_{u \text{ soil}} + 0.4726$	0.51
5	$c_{u \text{ comp}} = 1.7999 c_{u \text{ col}}/c_{u \text{ soil}} + 1.8989$	0.77

7.2.2 Korelasi Sudut Geser Dalam Komposit

Sudut geser dalam komposit kolom semen tanah ($\phi_{u \text{ comp}}$) dapat ditentukan melalui rasio sudut geser dalam semen lempung ($\phi_{u \text{ col}}$) dengan sudut geser dalam lempung lembut asal ($\phi_{u \text{ soil}}$) melalui 5 persamaan yang terdapat pada Gambar 7.2. Setiap persamaan diperoleh dari rasio d/S yang berbeda. Semakin besar rasio d/S yang digunakan, serta semakin bertambahnya rasio sudut geser dalam semen lempung ($\phi_{u \text{ col}}$) dengan sudut geser dalam lempung lembut asal ($\phi_{u \text{ soil}}$), maka semakin besar nilai sudut geser dalam komposit kolom semen tanah. Semua persamaan sudut geser dalam komposit kolom semen tanah terhadap rasio sudut geser dalam semen lempung ($\phi_{u \text{ col}}$) dengan sudut geser dalam lempung lembut asal ($\phi_{u \text{ soil}}$) dapat dilihat pada Tabel 7.2 berikut. Kesimpulannya bahwa untuk memperoleh sudut geser dalam komposit kolom semen tanah, perlu ditentukan dahulu rasio antara sudut geser dalam campuran lempung lembut semen dengan sudut geser dalam lempung lembut semua jadi. Dengan menetapkan terlebih dahulu rasio d/S yang akan digunakan, maka dapat ditentukan sudut geser dalam komposit kolom semen tanah melalui persamaan pada Gambar 7.2, atau dapat menggunakan Tabel 7.2.



Gambar 7.2.2 Korelasi antara sudut geser dalam komposit ($\phi_{u \text{ comp}}$) dengan rasio sudut geser dalam kolom semen dengan sudut geser dalam lempung lembut ($\phi_{u \text{ col}}/\phi_{u \text{ soil}}$).

Tabel 7.2 Persamaan sudut geser dalam komposit kolom semen tanah fungsi dari rasio $\phi_{u \text{ col}}/\phi_{u \text{ soil}}$

$\phi_{u \text{ soil}}$

Bil	Persamaan sudut geser dalam komposit ($\phi_{u \text{ comp}}$)	Rasio d/S
1	$\phi_{u \text{ comp}} = 0.7284 \phi_{u \text{ col}}/\phi_{u \text{ soil}} + 0.8586$	0.20
2	$\phi_{u \text{ comp}} = 0.8552 \phi_{u \text{ col}}/\phi_{u \text{ soil}} + 1.2418$	0.25

3	$\phi_{u \text{ comp}} = 1.0825 \phi_{u \text{ col}}/\phi_{u \text{ soil}} + 1.8166$	0.32
4	$\phi_{u \text{ comp}} = 1.2410 \phi_{u \text{ col}}/\phi_{u \text{ soil}} + 2.5182$	0.51
5	$\phi_{u \text{ comp}} = 1.6705 \phi_{u \text{ col}}/\phi_{u \text{ soil}} + 4.4861$	0.77

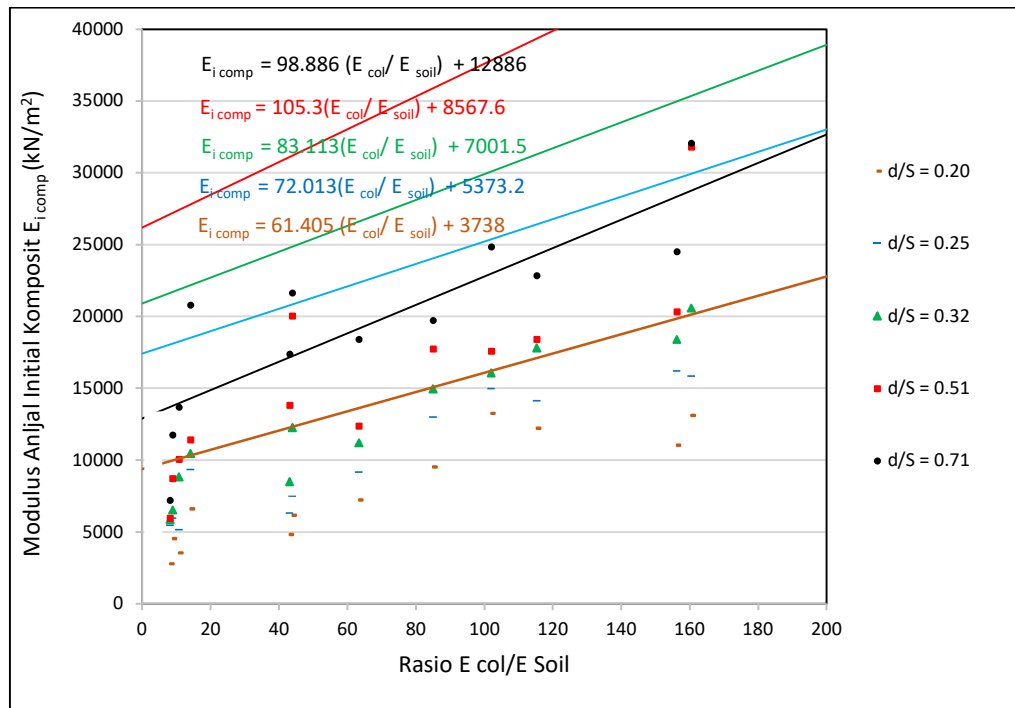
7.3 Korelasi Modulus Elastisitas Komposit (E_{comp})

Pada bahagian ini akan disyorkan persamaan korelasi perubahan modulus elastisitas komposit (E_{comp}) kolom semen tanah terhadap rasio modulus elastisitas kolom-asal. Dimana rasio modulus elastisitas kolom-asal adalah rasio antara modulus elastisitas kolom semen (E_{col}) dengan modulus elastisitas asal lempung (E_{soil}). Modulus elastisitas komposit dapat dibezakan melalui modulus elastisitas initial komposit ($E_{i \text{ comp}}$) dan modulus elastisitas sekan komposit ($E_{s \text{ comp}}$). Perbezaan ini dilakukan karena di dalam analisis rekabentuk geoteknik ada kalanya diperlukan modulus elastisitas initial komposit ($E_{i \text{ comp}}$) untuk analisis linear dengan tegangan rendah. Sedangkan untuk mendapatkan kapasiti disain menggunakan teori nonlinear diperpulan modulus elastisitas sekan komposit ($E_{s \text{ comp}}$).

7.3.1 Korelasi Modulus Elastisitas Initial Komposit ($E_{i \text{ comp}}$)

Modulus elastisitas initial komposit kolom semen tanah ($E_{i \text{ comp}}$) dapat ditentukan melalui rasio modulus elastisitas semen lempung (E_{col}) dengan modulus elastisitas lempung lembut asal (E_{soil}) melalui 5 persamaan seperti pada Gambar 7.3. Setiap persamaan diperoleh dari setiap rasio d/S yang berbeda. Modulus elastisitas initial komposit akan meningkat dengan peningkatan rasio modulus elastisitas kolom (E_{col}) dengan modulus semula tanah (E_{soil}). Peningkatan ini juga terjadi dengan peningkatan rasio d/S. Semua persamaan modulus elastisitas initial komposit kolom semen tanah terhadap rasio modulus elastisitas kolom-asal dapat dilihat Pada Judual 7.3 berikut.

Kesimpulannya bahwa untuk memperoleh modulus elastisitas initial komposit kolom semen tanah, perlu ditentukan dahulu rasio modulus elastisitas kolom-asal. Dengan menetapkan terlebih dahulu rasio d/S yang akan terjadi, maka dapat ditentukan modulus elastisitas initial komposit kolom semen tanah melalui persamaan pada Gambar 7.3, atau melalui Tabel 7.3.



Gambar 7.3 Korelasi antara modulus elastisitas initial komposit ($E_{i\ comp}$) dengan rasio modulus elastisitas lempung semen dengan modulus elastisitas lempung lembut semula jadi ($E\ col/E\ soil$).

Tabel 7.3 Persamaan modulus elastisitas initial komposit kolom semen tanah fungsi dari rasio $E\ col/E\ soil$

Bil	Persamaan modulus elastisitas initial komposit kolom semen tanah ($E_{i\ comp}$)	Rasio d/S

1	$E_{i \text{ comp}} = 61.405 E_{\text{col}}/ E_{\text{soil}} + 3738$	0.20
2	$E_{i \text{ comp}} = 107.30 E_{\text{col}}/ E_{\text{soil}} + 8567.6$	0.25
3	$E_{i \text{ comp}} = 83.113 E_{\text{col}}/ E_{\text{soil}} + 7001.5$	0.32
4	$E_{i \text{ comp}} = 1.1545 E_{\text{col}}/ E_{\text{soil}} + 0.4726$	0.51
5	$E_{i \text{ comp}} = 98.886 E_{\text{col}}/ E_{\text{soil}} + 12886$	0.77

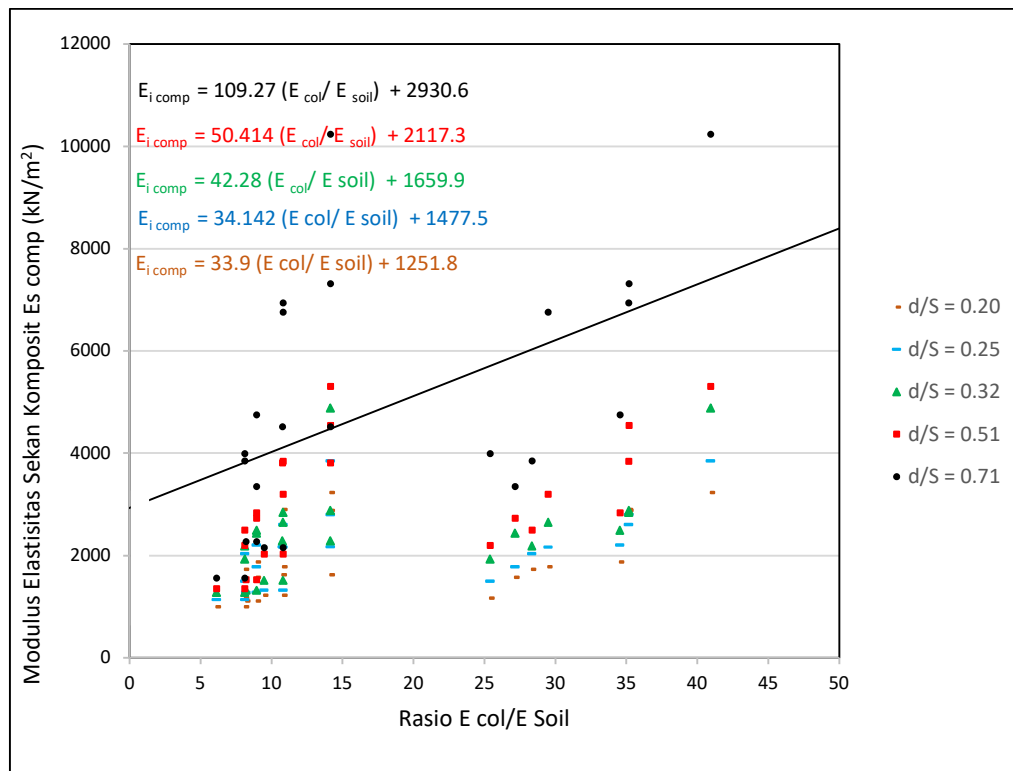
7.3.2 Korelasi Modulus Elastisitas Sekan Komposit ($E_{s \text{ comp}}$)

Modulus elastisitas sekan komposit kolom semen tanah ($E_{s \text{ comp}}$) dapat ditentukan melalui rasio modulus elastisitas kolom-asal ($E_{\text{col}}/ E_{\text{soil}}$) dengan 5 persamaan seperti pada Gambar 7.4 Setiap persamaan diperoleh dari setiap rasio d/S yang berbeda. Modulus elastisitas sekan initial komposit akan mingkat dengan peningkatan modulus elastisitas taing-asal ($E_{\text{col}}/E_{\text{soil}}$). Peningkatan ini juga terjadi dengan peningkatan kepada rasio jarak d/S. Semua persamaan modulus elastisitas sekan komposit kolom semen tanah terhadap rasio modulus elastisitas kolom-asal dapat dilihat Pada Tabel 7.4 berikut.

Kesimpulannya bahwa untuk memperoleh modulus elastisitas sekan komposit kolom semen tanah ($E_{s \text{ comp}}$), perlu ditentukan dahulu rasio modulus elastisitas kolom-asal ($E_{\text{col}}/E_{\text{soil}}$). Dengan menetapkan terlebih dahulu rasio d/S yang akan digunakan, maka dapat ditentukan modulus elastisitas sekan komposit kolom semen tanah melalui persamaan pada Tabel 7.4, atau dapat menggunakan Gambar 7.4.

Tabel 7.4 Persamaan modulus elastisitas sekan komposit kolom semen tanah fungsi dari rasio E_{col}/E_{soil}

Bil	Persamaan modulus elastisitas sekan komposit kolom semen tanah ($E_{s\ comp}$)	Rasio d/S
1	$E_{s\ comp} = 33.900 E_{col}/ E_{soil} + 1251.8$	0.20
2	$E_{s\ comp} = 34.142 E_{col}/ E_{soil} + 1477.5$	0.25
3	$E_{s\ comp} = 42.280 E_{col}/ E_{soil} + 1659.9$	0.32
4	$E_{s\ comp} = 50.414 E_{col}/ E_{soil} + 2117.3$	0.51
5	$E_{s\ comp} = 109.27 E_{col}/ E_{soil} + 2930.6$	0.77



Gambar 7.3.2 Korelasi antara modulus elastisitas sekan komposit ($E_s \text{ comp}$) dengan rasio modulus elastisitas kolom semen dengan modulus elastisitas lempung lembut ($E_{\text{ col}}/E_{\text{ soil}}$).

BAB VIII

KESIMPULAN

8.1 Kesimpulan Penelitian Rasio Kekuatan Geser

Dari uji triaksial dan uji geser langsung pada model sampel kolom semen tanah, didapat kesimpulan sebagai berikut :

1. Rasio kekuatan geser pada model sampel kolom semen tanah ini tergantung pada masa perawatan yang berlaku, serta variasi rasio d/S dan kandungan semennya. Di dalam uji triaksial model sampel kolom semen tanah, menunjukkan bahwa rasio kekuatan geser ($\Delta\sigma/\sigma_3$) adalah paling minimum pada keadaan sampel dengan rasio d/S dan kandungan semen yang paling kecil. Rasio kekuatan geser akan meningkat dengan naiknya rasio d/S serta kenaikan kandungan semen pada sampel komposit kolom semen tanah serta masa perawatan dari 7 hari hingga 28 hari dan akhirnya 56 hari (Tabel 5.1-5.3 dan Gambar 5.1-5.3).
2. Rasio kekuatan geser minimum ialah 0.158 pada kandungan semen 150 kg/m³ pada rasio d/S sebesar 0.20 dengan perawatan 7 hari (Tabel 5.4-5.6 dan Gambar 5.8-5.10). Manakala rasio kekuatan geser maksimum ialah 5.202 pada kandungan semen 300 kgPC/m³ dengan rasio d/S sebesar 0.71 dengan masa perawatan 56 hari.
3. Uji kekuatan geser dengan triaksial menunjukkan bahwa masa perawatan secara umumnya menjadi factor terhadap terjadinya peningkatan rasio kekuatan geser. Kenaikan rasio kekuatan geser pada masa perawatan 7 hari kepada 28 hari adalah lebih besar bila dirasioikan kenaikan pada masa perawatan 28 hari ke 56 hari (Gambar 5.14). Perbedaan kenaikan rasio kekuatan geser tersebut berlaku untuk semua rasio d/S.
4. Perubahan rasio kekuatan geser dari pada uji geser langsung memiliki kelakuan yang serupa dengan perubahan rasio kekuatan geser dari uji triaksial. Secara umumnya perubahan rasio kekuatan geser dari uji geser langsung terhadap masa perawatan sampel kolom semen tanah menunjukkan bahwa perubahan dari masa perawatan 7 hari hingga masa perawatan 28 hari adalah lebih besar apabila dibandingkan dari 28 hari ke 56 hari masa perawatan. Besar dan perubahan kenaikan rasio kekuatan geser dari uji geser langsung lebih besar bila dibandingkan kenaikan perubahan rasio kekuatan geser dari uji triaksial.

5. Perbezaan parameter kekuatan geser pada uji semula lempung lembut Kroya. terjadinya karena terdapat perbezaan pola keruntuhan antara uji triaksial dan uji geser langsung di dalam penentuan kekuatan geser. Pada Tabel 5.7 purata rasio kekuatan geser hasil uji triaksial lempung lembut Kroya adalah 0.132, manakala untuk hasil uji geser langsung bernilai 0.144 seperti pada Tabel 5.8. Peratusan perubahannya ialah lebih besar 9,1% rasio kekuatan geser dari uji langsung pada pada uji triaksial.
6. Peratus kenaikan rasio kekuatan geser dari uji triaksial dirasiokan kepada rasio kekuatan geser semula lempung lembut Kroya. Peratus kenaikan ini berlaku karena peningkatan terhadap kandungan semen, masa perawatan dan rasio d/S. Peratus kenaikan minimum dari uji triaksial berlaku pada kandungan semen 150 kgPC/m³ ketika perawatan 7 hari dan rasio d/S = 0.20 ialah 112.4%. Peratus kenaikan tertinggi ialah 1048.3% berlaku pada kandungan semen 300 kgPC/m³, pada masa perawatan 56 hari dengan rasio d/S sebesar 0.71 (Tabel 5.9 dan Gambar 5.22).
7. Peratus kenaikan rasio kekuatan geser dari uji geser langsung dirasiokan terhadap rasio kekuatan geser semula lempung lembut Kroya. Peratus kenaikan ini berlaku akibat dari peningkatan kepada kandungan semen, peningkatan masa perawatan dan peningkatan rasio d/S. Peratus kenaikan paling rendah dari uji geser langsung yang berlaku pada kandungan semen 150 kgPC/m³ pada masa perawatan 7 hari dan rasio d/S = 0.20 ialah 182.9%. Peratus kenaikan paling tertinggi ialah 2204.3% berlaku pada kandungan semen 300 kgPC/m³, pada masa perawatan 56 hari dengan rasio d/S sebesar 0.71 (Tabel 5.10, Gambar 5.23a, Gambar 5.2b).
8. Secara umum dapat terlihat bahwa peratus kenaikan kekuatan geser dari uji geser langsung adalah lebih besar dari pada kenaikan peratus rasio kekuatan geser dengan uji triaksial. Perbezaan peratus kenaikan rasio kekuatan geser antara uji geser langsung dengan uji triaksial dari keseluruhannya dengan julat antara 30% hingga 210%.

8.2 Kesimpulan Kekuatan Geser Komposit dan Modulus Komposit

Kekeuatan geser komposit dari uji triaksial dan geser langsung model sampel kolom semen tanah dan modulus anjal dari uji triaksial dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Penelitian faktor kekuatan geser komposit model kolom semen tanah dari uji triaksial. Kekuatan geser komposit model kolom tanah semen dari uji triaksial. Perubahan kekuatan geser yang merupakan kekohesian komposit (c_{comp}) dan sudut geser dalam komposit (ϕ_{comp}) akan dilakukan pada kolom semen tanah dengan empat variasi kandungan semen, tiga variasi masa perawatan dan lima variasi rasio d/S. Kekuatan geser dilakukan melalui uji triaksial dan uji geser langsung.
2. Pada sampel model kolom semen tanah, apabila semakin besar kandungan semen, masa perawatan akan menjadi lebih lama dan semakin besar rasio d/S peningkatan kekohesian komposit (c_{comp}). Pada masa perawatan 7 hari, dengan uji triaksial kekohesian komposit minimum adalah 3 kN/m^2 pada kandungan semen 150 kgPC/m^3 dengan rasio d/S 0.20 atau kenaikan 100% dari kekohesian semula jadi. Manakala kekohesian komposit maksimum adalah 36 kN/m^2 pada kandungan semen 300 kg/m^2 dengan rasio d/S 0.71.
3. Perubahan kekohesian komposit kolom semen tanah dengan uji triaksial akibat variasi rasio d/S dan kandungan semen dengan masa perawatan 7 hari, 28 hari, dan 56 hari ditampilkan dalam Gambar 6.1, 6.3, dan 6.5. Sedangkan Purata perubahan kekohesian komposit kolom semen tanah dengan uji triaksial akibat variasi rasio d/S dan kandungan semen dengan masa perawatan 7 hari, 28 hari, dan 56 hari ditampilkan pada Gambar 6.2, 6.4, dan 6.6.
4. Manakala kekohesian komposit maksimum 40 kN/m^2 berlaku pada kandungan semen 300 kg/m^2 dengan rasio d/S 0.71 dan masa perawatan 56 hari atau kenaikan lebih dari 1300% dari kekohesian semula jadi. Had atas dan bawah kekohesian komposit purata kolom semen tanah terhadap Rasio d/S dan kandungan semen pada masa perawatan 7 hari, 28 hari, dan 56 hari uji triaksial, (a) 150 kgPC/m^3 , (b) 200 kgPC/m^3 , (c) 250 kgPC/m^3 dan (d) 300 kgPC/m^3 ditampilkan pada Gambar 6.7-6.9.

5. Peratus perubahan kekohesian komposit dari model kolom semen tanah dari uji triaksial menunjukkan pertambahan akibat variasi rasio d/S. Pertambahan peratus kekohesian komposit juga berlaku dengan pertambahan masa perawatan dari 7 hari hingga 56 hari dan pertambahan kandungan semen dari 150 hingga 300 kgPC/m³ (Gambar 6.13). Peratus kenaikan kekohesian komposit minimum berlaku pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 150 kg/m³ pada masa perawatan 7 hari. Bila kandungan semen bertambah 300 kgPC/m³ maka peratus pertambahan kekohesian komposit akan maksimum dan bertambah hingga 4000 % pada masa perawatan 56 hari dan d/s sebesar 0.71 (Gambar 6.13).
6. Lempung lembut Kroya semula jadi yang memiliki kekuatan geser yang sangat kecil kekohesian (c_u) maupun sudut geser dalam (ϕ_u) akan bertambah kekuatan geser kompositnya bila berlaku penambahkuatan dengan kolom semen tanah. Sudut geser dalam lempung lembut semula jadi yang pada umumnya kecil atau mendekati bilangan sifar (0). Sudut geser dalam komposit akan bertambah secara ketara melalui penambahbaikan berupa kolom semen tanah melalui uji triaksial dengan sampel model kolom semen tanah.
7. Hingga pada masa perawatan 7 hari dengan rasio d/S 0.20 dan kandungan semen 150 kgPC/m³ sudut geser dalam komposit (ϕ_{uc}) minimum sebesar 2.3°. Perubahan sudut geser dalam komposit kolom semen tanah dengan uji triaksial akibat variasi rasio d/S dan kandungan semen dengan masa perawatan 7 hari, 28 hari, dan 56 hari dirangkum dalam Gambar 6.14, 6.17, dan 6.20.
8. Persamaan sudut geser dalam komposit purata kolom semen tanah dengan uji triaksial akibat variasi rasio d/S dan kandungan semen dengan masa perawatan 7 hari, 28 hari, dan 56 hari disajikan dalam Gambar 6.16, 6.19, dan 6.20. Peningkatan sudut geser dalam komposit maksimum pada masa perawatan 56 hari, yang berlaku pada kandungan semen 300 kgPC/m³ sebesar 14.5° dan s/d 0.71. Had sudut geser dalam komposit maksimum dan minimum dari hasil uji triaksial pada masa uji 7 hari, 28 hari, dan 56 hari disummarykan pada Gambar 6.23, 6.24, dan 6.25.
9. Persamaan penambahan sudut geser dalam komposit kolom semen tanah dengan uji triaksial akibat variasi kandungan semen, rasio d/S dan masa perawatan

dapat dilihat pada Tabel 6.8. Peratusan perubahan sudut geser dalam komposit dari model kolom semen tanah dari uji triaksial menunjukkan pertambahan akibat variasi rasio d/S, pertambahan masa perawatan dari 7 hari hingga 56 hari dan pertambahan kandungan semen dari 150 hingga 300 kgPC/m³ (Gambar 6.26). Pada masa perawatan 7 hari, peratus kenaikan sudut geser dalam komposit minimum berlaku pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 150 kg/m³ yaitu sebesar 90%. Bila kandungan semen bertambah hingga 300 kgPC/m³ dan perawatan 56 hari serta d/s sebesar 0.71 maka peratus pertambahan sudut geser dalam komposit akan maksimum dan bertambah hingga 394 %.

10. Kekohesian komposit dan sudut geser dalam komposit akan model sampel kolom semen tanah melalui uji geser langsung yang telah dilakukan untuk menentukan perubahan akibat variasi rasio d/S 0.20 hingga d/S 0.71, kandungan semen dari 150, 200, 250 dan 300 kgPC/m³, masa perawatan sampel mulai dari 7 hari, 28 hari hingga 56 hari. Pada sampel model kolom semen tanah melalui uji geser langsung memiliki kelakuan yang sama dengan uji triaksial, namun dengan skala yang berbeza, Semakin besarnya kandungan semen, semakin lama masa perawatan dan semakin besar rasio d/S berlaku peningkatan kekohesian komposit (c_{comp}). Pada masa perawatan 7 hari, dengan uji geser langsung berlaku kekohesian komposit minimum 9.8 kN/m² pada kandungan semen 150 kgPC/m³ dengan rasio d/S 0.20. Kekohesian komposit purata maksimum pada masa perawatan 56 hari (Gambar 6.34) pada rasio d/S 0.71, dan kandungan semen 300 kgPC/m³ menjadi 119.6 kN/m² atau berlaku penambahan 388.7 % dari kekohesian semula jadi.
11. Persamaan penambahan kekohesian komposit kolom semen tanah dengan uji geser langsung akibat variasi kandungan semen, variasi rasio d/S dan variasi masa perawatan dapat dilihat pada Tabel 6.12. Had kekohesian komposit maksimum dan minimum dari hasil uji geser langsung pada masa uji 7 hari, 28 hari, dan 56 hari dapat dilihat pada Gambar 6.36, 6.37, dan 6.38.
12. Peratusan perubahan kekohesian komposit dari model kolom semen tanah dari uji geser langsung menunjukkan pertambahan akibat variasi rasio d/S, pertambahan masa perawatan dari 7 hari hingga 56 hari dan pertambahan

kandungan semen dari 150 hingga 300 kgPC/m³. Peratus kenaikan kekohesian komposit minimum berlaku pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 150 kg/m³ pada masa perawatan 7 hari, yaitu sebesar 179 %. Pada masa perawatan 56 hari, bila kandungan semen bertambah hingga 300 kgPC/m³ maka peratus pertambahan kekohesian komposit akan maksimum dan bertambah hingga 1800 %.

13. Kekuatan geser yang berlaku dari uji triaksial dan uji geser langsung hasilnya tidaklah sama, karena perbezaan bidang satah kegagalan yang berlaku berbeza pada kedua uji tersebut. Pada umumnya kekuatan geser dari uji geser langsung akan berlaku lebih besar daripada kekuatan geser dengan uji triaksial.
14. Perubahan sudut geser dalam komposit kolom semen tanah dengan uji geser langsung akibat variasi rasio d/S dan kandungan semen dengan masa perawatan 7 hari, 28 hari, dan 56 hari, ditampilkan dalam Gambar 6.40, 6.42, dan 6.44. Had sudut geser dalam komposit maksimum dan minimum dari hasil uji geser langsung pada masa uji 7 hari, 28 hari, dan 56 hari dapat dilihat pada Gambar 6.46, 6.47, dan 6.48.
15. Peratus perubahan sudut geser dalam komposit dari model kolom semen tanah dari uji geser langsung menunjukkan pertambahan akibat variasi rasio d/S, Pertambahan peratus sudut geser dalam komposit juga berlaku dengan pertambahan masa perawatan dari 7 hari hingga 56 hari dan pertambahan kandungan semen dari 150 hingga 300 kgPC/m³ (Gambar 6.49). Pada masa perawatan 7 hari, peratus kenaikan sudut geser dalam komposit minimum berlaku pada rasio d/S 0.20 dengan kandungan semen 150 kg/m³ yaitu sebesar 175 %. Pada masa perawatan 56 hari, rasio d/S hingga 0.71, bila kandungan semen bertambah hingga 300 kgPC/m³ maka peratus pertambahan sudut geser dalam komposit akan maksimum dan bertambah hingga 2030 % (Gambar 6.49).
16. Dari uji triaksial model kolom semen tanah didapatkan lengkung tegasan terikan dari setiap sampel dengan variasi rasio d/S, kandungan semen serta masa perawatan. Siap satu sampel dilakukan dengan tiga tegasan keliling yang berbeza, sehingga setiap lengkung dapat diperoleh modulus anjal (E). Modulus

anjalan yang diperolehi berupa modulus anjal initial komposit (E_{ic}), modulus anjal sekan komposit (E_{sc}),

17. Modulus anjal initial komposit (E_{ic}) diperolehi dari garis kemiringan lengkung pada initial tegasan terikan, yang merupakan rasio antara tegasan dengan terikan saat semula tegasan berlaku. Manakala modulus anjal sekan komposit (E_{sc}) adalah garis kemiringan lengkung yang diperolehi dari titik awal tegasan semula menuju tegasan maksimum pada lengkung, dan merupakan rasio antara tegasan maksimum dengan terikan saat tegasan maksimum berlaku. Modulus anjal initial komposit dari semua sampel model kolom semen tanah dengan uji triaksial pada masa perawatan 7 hari, 28 hari, dan 56 hari dapat dilihat pada Gambar 6.50, 6.52, dan 6.54. Pada masa perawatan 7 hari dengan kandungan semen 150 kgPC/m^3 , modulus anjal initial komposit pada rasio 0.20 sebesar 2778 N/m^2 menjadi sebesar 7193 kN/m^2 pada rasio d/S 0.71, atau berlaku pertambahan sebesar 158.9%. Manakala pada kandungan semen 300 kgPC/m^3 , modulus anjal initial komposit pada rasio 0.20 sebesar 6587 kN/m^2 menjadi sebesar 25500 kN/m^2 pada rasio d/S 0.71, atau berlaku pertambahan sebesar 287.1 %. Sedangkan modulus anjal initial purata komposit kolom semen tanah dengan variasi rasio d/S dan kandungan semen, masa perawatan 7 hari, 28 hari, dan 56 hari dapat dilihat pada Gambar 6.51, 6.53, dan 6.55. Pada masa perawatan 56 hari dengan kandungan semen 150 kgPC/m^3 , modulus anjal initial komposit pada rasio 0.20 sebesar 7230 kN/m^2 menjadi sebesar 18406 kN/m^2 pada rasio d/S 0.71, atau berlaku pertambahan sebesar 154.6 %. Pada kandungan semen 300 kgPC/m^3 , modulus anjal initial komposit pada rasio 0.20 sebesar 15839 kN/m^2 menjadi sebesar 30307 kN/m^2 pada rasio d/S 0.71, atau berlaku pertambahan sebesar 91.34 %.
18. Modulus anjal sekan komposit dari semua sampel model kolom semen tanah dengan uji triaksial pada masa perawatan 7 hari, 28 hari, dan 56 hari dapat dilihat pada Gambar 6.56, 6.58, dan 6.60. Sedangkan modulus anjal sekan purata komposit kolom semen tanah dengan variasi rasio d/S dan kandungan semen, masa perawatan 7 hari, 28 hari, dan 56 hari ditampilkan pada Gambar 6.57, 6.58,

dan 6.61. Perawatan 56 hari pertambahan modulus anjal sekan komposit yang maksimum berlaku pada kandungan semen 300 kgPC/m^3 pada rasio d/S 0.71.

8.3 Hasil Penelitian Korelasi Parameter Kekuatan Geser Komposit Dan Modulus Elastisitas Komposit

Hasil penelitian korelasi antara kekuatan geser komposit dan modulus elastisitas komposit dengan kekuatan geser dan modulus elastisitas semula lempung dapat dilihat sebagai berikut:

1. Di dalam rekabentuk timbunan yang memerlukan penambahbaikan menggunakan metoda kolom semen tanah, parameter yang diperlukan oleh mekanik lempung komposit adalah kekuatan geser komposit dan modulus elastisitas komposit. Magnitud kohesi komposit dan sudut geser dalam komposit serta modulus elastisitas komposit dapat dikira melalui metoda model sampel kolom semen tanah. Penulis telah berhasil mempropose korelasi parameter lempung lembut dengan parameter lempung komposit dalam kestabilan penambahbaikan cerun.
2. Kohesi komposit kolom semen tanah ($c_{u \text{ comp}}$) dapat ditentukan melalui rasio kohesi semen lempung ($c_{u \text{ col}}$) dengan kohesi lempung lembut asal ($c_{u \text{ soil}}$) untuk berbagai rasio d/S (Gambar 7.1). Semakin besar rasio d/S yang digunakan, serta semakin bertambahnya rasio kohesi semen lempung ($c_{u \text{ col}}$) dengan kohesi lempung lembut asal ($c_{u \text{ soil}}$), maka semakin besar nilai kohesi komposit kolom semen tanah. Sehingga untuk *design engineer*, untuk memperoleh kohesi komposit kolom semen tanah, perlu ditentukan dahulu rasio antara kohesi campuran lempung lembut semen dengan kohesi lempung lembut semua jadi dan rasio d/S yang akan digunakan, melalui persamaan pada Gambar 7.1.
3. Sudut geser dalam komposit kolom semen tanah ($\phi_{u \text{ comp}}$) dapat ditentukan melalui rasio sudut geser dalam semen lempung ($\phi_{u \text{ col}}$) dengan sudut geser

dalam lempung lembut asal ($\phi_{u \text{ soil}}$) melalui berbagai rasio d/S yang berbeda. Semakin besar rasio d/S yang digunakan, serta semakin bertambahnya rasio sudut geser dalam semen lempung ($\phi_{u \text{ col}}$) dengan sudut geser dalam lempung lembut asal ($\phi_{u \text{ soil}}$), maka semakin besar nilai sudut geser dalam komposit kolom semen tanah. Sehingga untuk *design engineer*, untuk memperoleh sudut geser dalam komposit kolom semen tanah, perlu ditentukan dahulu rasio antara sudut geser dalam campuran lempung lembut semen dengan sudut geser dalam lempung lembut semua jadi. Dengan menetapkan terlebih dahulu rasio d/S yang akan digunakan, maka dapat ditentukan sudut geser dalam komposit kolom semen tanah melalui persamaan pada Gambar 7.2, atau dapat menggunakan Tabel 7.2.

4. Modulus elastisitas komposit dapat dibedakan melalui modulus elastisitas initial komposit ($E_{i \text{ comp}}$) dan modulus elastisitas sekan komposit ($E_{s \text{ comp}}$). Perbezaan ini dilakukan karena di dalam analisis rekabentuk geoteknik ada kalanya diperlukan modulus elastisitas initial komposit ($E_{i \text{ comp}}$) untuk analisis linear dengan tegangan rendah. Sedangkan untuk mendapatkan kapasitas disain menggunakan teori nonlinear diperlukan modulus elastisitas sekan komposit ($E_{s \text{ comp}}$). Penulis telah berhasil mempropose persamaan korelasi perubahan modulus elastisitas komposit (E_{comp}) kolom semen tanah terhadap rasio modulus elastisitas kolom-asal. Dimana rasio modulus elastisitas kolom-asal adalah rasio antara modulus elastisitas kolom semen (E_{col}) dengan modulus elastisitas asal lempung (E_{soil}).
5. Penulis juga telah mengajukan koreksi untuk mendapatkan korelasi modulus elastisitas initial komposit ($E_{i \text{ comp}}$). Modulus elastisitas initial komposit kolom semen tanah ($E_{i \text{ comp}}$) dapat ditentukan melalui rasio modulus elastisitas semen lempung (E_{col}) dengan modulus elastisitas lempung lembut asal (E_{soil}) untuk berbagai rasio d/S (Gambar 7.3). Modulus elastisitas initial komposit akan meningkat dengan peningkatan rasio modulus elastisitas kolom (E_{col}) dengan modulus semula tanah (E_{soil}). Peningkatan ini juga terjadi dengan peningkatan rasio d/S . Sehingga untuk *design engineer*, untuk memperoleh modulus elastisitas initial komposit kolom semen tanah, perlu ditentukan dahulu rasio

modulus elastisitas kolom-asal. Dengan menetapkan terlebih dahulu rasio d/S yang akan terjadi, maka dapat ditentukan modulus elastisitas initial komposit kolom semen tanah melalui persamaan pada Gambar 7.3.

6. Modulus elastisitas sekan komposit kolom semen tanah ($E_{s \text{ comp}}$) dapat ditentukan melalui rasio modulus elastisitas kolom-asal ($E_{\text{col}}/E_{\text{soil}}$) dengan berbagai d/S (Gambar 7.4). Modulus elastisitas sekan initial komposit akan meningkat dengan peningkatan modulus elastisitas taing-asal ($E_{\text{col}}/E_{\text{soil}}$). Peningkatan ini juga terjadi dengan peningkatan kepada rasio jarak d/S . Sehingga untuk *design engineer*, untuk memperoleh modulus elastisitas sekan komposit kolom semen tanah ($E_{s \text{ comp}}$), perlu ditentukan dahulu rasio modulus elastisitas kolom-asal ($E_{\text{col}}/E_{\text{soil}}$). Dengan menetapkan terlebih dahulu rasio d/S yang akan digunakan.

REFERENSI

- Akinwumi I.I., A. I. (2015). Effect of Corncob ash on the geotechnical of Lateritic soil stabilized with Portlant sementInternational Journal of Geomatic and Geosciences . Volume 5, No. 3, 2015.
- Alatas I.M. (1991). Stabilisasi Pada Lempung Losari Dengan Kapur dan Semen, . Thesis S2 Graduate, ITB, 1991 (Unpublished).

- Asikin, S., Handoyo, A., Prastistho, B.. . (1992). Peta Geologi Lembar Banyumas, Jawa. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung.
- Alatas I.M. (1991). Stabilisasi Pada Lempung Losari Dengan Kapur dan Semen, Thesis S2 Graduate, ITB, 1991 (Unpublished).
- Amr A. Hemada, A. M. G. a. T. T. A.-F. (2021). Assessment of the Efficiency of Rigid Inclusions as a Settlement Control System – Case Study International Conference on Advances in Structural and Geotechnical Engineering ICASGE'21.
- Anand J. Puppala, R. S. M., and Soheil Nazarian. (2022). Full-Scale Field Studies to Evaluate Deep Soil Mixing in Stabilizing Expansive Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- ASTM D 422-72. (1989). Standard Method for Particle-Size Analysis of Soils. Annual Book for ASTM Standard.
- ASTM D 653-88. (1989). Standard Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluids. In Annual Book of ASTM Standard.
- ASTM D 854-83. (1989). Test Method for Specific Gravity of Soils. In Annual Book of ASTM Standard.
- ASTM D 2216-80. (1989). Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil Rock, and Soil-Aggregate Mistures. In Annual Book of ASTM Standard.
- ASTM D 2435-04. (2011). Standard Test Methods for One-Dimensional Konsolidasi Properties of Soils Using Incremental Loading. American Standard for Testing Bahan.
- ASTM D 2850-87. (1989). Test Method for Unconsolidated Undrained Compressive Strength of Cohesive Soils in Triaxial Compression. In Annual Book of ASTM Standard.
- ASTM D 4318-84. (1989). Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasicity Index of Soils. In Annual Book of ASTM Standard.
- ASTM D 6528-17. (2017). Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Fine Grain Soils. American Standard for Testing Bahan.

- Atijit Sukponya, A. J. (2016). Large simple shear testing of soft Bangkok clay stabilized with soil–semen-columns and its application
The Japanese Geotechnical Society. Production and hosting by Elsevier B.V. All rights reserved.
- Bauer Pratama Indonesia PT, Promisco PT. (2016). Tinjauan Teknis Deep Soil Mixing (DSM) Pada Pembangunan Double Track KA Lintas Puwokerto-Kroya Final Project Report.
- Brian C. Metcalfe, P. E., Kord J. Wissmann, Ph.D., P.E., Stephen S. Weyda, P.E., and Bruce Bush. (2020). Ground Improvement for Foundation Support in Organic Soils Geo-Congress 2020 GSP 315.
- Buddhima Indraratna, J. C. (2005). Ground Improvement — Case Histories. ELSEVIER GEO-ENGINEERING BOOK SERIES ISIPADU 3.
- Chana Phutthananon, P. J., Sutee Nakin, Sompote Youwai, Mohammad Hajiaziz, Pitthaya Jamsawang. (2022). State parameter governing the mechanical properties of semen-treated clays. Marine Georesources & Geotechnology.
- Cheang W. (2013). Initial Stress and Phy-C Reduction Analysis. Computational Geotechnics Course (2D Plaxixs Course). Bandung-Indonesia, 9-11 December 2013.
- Damrizal Damoerin, W. A. P., Yunita Utami. (2015). IMPROVING SHEAR STRENGTH OF CLAY BY USING SEMEN COLUMN REINFORSEMEN UNDER CONSOLIDATED UNDRAINED TEST International Journal of Technology (2015) 4: 709-717 ISSN 2086-9614.
- E. Jampole, M. A., E. Miranda, M. ASCE, and G. Deierlein, F. ASCE. (2018). Effective Incremental Ground Velocity for Estimating the Peak Sliding Displasemen of Rigid Structures to Pulse-Like Earthquake Ground Motions J. Eng. Mech., 2018, 144(12): 04018113.
- Engineering Journal of the University of Qatar, Vol. 14,2001, pp 61-76. Sankar Bhattacharja, a. J. I. B. (2003). Comparative Performance of Portland Cement and Lime Stabilization of Moderate to High Plasticity Clay Soils Research and Development Bulletin RD125, Portland Cement Association PCA R&D Serial No. 2435 2003.

- Fangtong Wang, K. L., Yong Liu. (2022). Optimal water-semen ratio of semen-stabilized soil Construction and Building Bahans Isipadu 320, 21 February 2022, Elsevier.
- Guanbao Yea, Q. Z., Zhen Zhanga, Hongtao Chang. (2015). Centrifugal modeling of a composite foundation combined with soil–semen columns and prefabricated vertical drains. The Japanese Geotechnical Society. Production and hosting by Elsevier B.V. All rights reserved.
- Heinz J. Priebe. (1995). The Design of Vibro Replasemen GROUND ENGINEERING, Technical paper GT 073-13 E.
- Ho D.Y.F, F. D. G. (1982). A Multistage Triaxial Test for Unsaturated Soil. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol.5 No.1/2, March/June 1982, pp 18-25.
- Hong-Son Nguyen, Y. A., Takuma Kizuki, Hiroyuki Maeba, Shinya Inazumi2. (2020). INTEGRATION OF INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGY (ICT) INTO SEMEN DEEP MIXING METHOD. International Journal of GEOMATE, Oct., 2020, Vol.19, Issue 74, pp.194–200 ISSN: 2186-2982 (P), 2186-2990 (O), Japan, DOI: <https://doi.org/10.21660/2020.74.9329> Geotechnique, Construction Bahans and Environment.
- Hormdee D, K. N., Angsuwotai, P. (2012). Evaluation on The Results of Multistage Shear Test. Int. J. Of GEOMATE, March 2012, Vol.2, No.1, (SI No.3), PP.140-143.
- Huu-Dao Do, V.-N. P., Cao-Tho Phan, Anand Puppala, and Erwin Oh. (2020). Full-Scale Experimental Study on the Single and Group of Soil Semen Columns under Vertical Load Applying for Buildings Geotechnical Testing Journal, ASTM.
- I. Meepon, P. V. a. P. J. (2016). Behaviors of soil semen columns and stiffened soil semen column wall in shallow excavation Lowland Technology International 2016; 18 (3): 197-208 International Association of Lowland Technology (IALT): ISSN 1344-9656.

- Izabela Karpisz, J. P., Leszek Cichy and Dariusz Sobala. (2018). Study of the effect of semen amount on the soil-semen sample strength IOP Conf. Series: Bahans Science and Engineering 365 (2018).
- J. Wehr, M. T., and W. Sondermann. (2013). DESIGN RISKS OF GROUND IMPROVEMENT METHODS INCLUDING RIGID INCLUSIONS Geotechnical Society of Singapore (GeoSS). Published by Research Publishing. ISBN: 978-981-07-4948-4: doi:10.3850/978-981-07-4948-4 371.
- Jinchun Chai, J. C. (2012). Lateral displacements due to installation of soil-semen columns ISSMGE - TC 211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI Brussels 31 May & 1 June 2012.
- Khairun Nissa Mat Said, A. S. A. R., Ng Kok Shien and Nor Zurairahetty, Mohd Yunus. (2019). Load Transfer Mechanism of Group of Floating Soil-Semen Column In mproving Soft Ground IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 220 (2019) 012003.
- Klaudia Jendrysik1, M. K., and Hubert Szabowicz. (2018). Preliminary results of dry Deep Soil Mixing soil-semen composite testing MATEC Web of Conferences 251, 01025 (2018).
- L. Bałachowski and J. Konkol. (2021). Pore Water Pressure Development in Soft Soil due to Installation and Loading of Controlled Modulus Columns J. Geotech. Geoenviron. Eng., 2021, 147(12): 06021014.
- Le Van Tuan, Y. Z., ShuXin Deng, Phung Vinh An, Ha Thanh Lan,. (2015). Numerical Analysis of the Influence of Replasemen Area Ratio in Foundation Reinforced with Soil Semen Columns EJGE, Vol. 20 [2015], Bund. 9.
- Li Liu, T. D., Yongfeng Deng, Liangtong Zhan, Suksun Horpibulsuk, Qiong Wang. (2022). Stabilization nature and unified strength characterization for semen-based stabilized soils Construction and Building Bahans, Isipadu 336, 20 June 2022, Elsevier.
- Liang Chern Chow, J. G. B., Alex Potter-Weight, and Andrew J. Eller;. (2020). An Overview of Performance Monitoring for Drilled Full Displasemen Type Rigid Inclusions under Highway Embankments Geo-Congress 2020 GSP 321.

- Liang Chern Chow, J. H., and Gregory R. Reuter,. (2020). Field Monitoring of Negative Skin Friction on Rigid Inclusion Columns under Embankment Geo-Congress 2020 GSP 315.
- M. Bouassida and J. P. Carter, M. A. (2014). Optimization of Design of Column-Reinforced Foundations. *Int. J. Geomech.*,
- M. Khosravi, M. P., A. Soroush, S. Zaregarizi , W. Y. Hung, A. Nabizadeh. (2020). DYNAMIC CENTRIFUGE TEST OF AN EMBANKMENT UNDERLAIN A LIQUIFIABLE SOIL AND ISOLATED SOIL-SEMEN COLUMNS 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE Sendai, Japan - September 13th to 18th 2020.
- Mark Bolton, J. N., Erwin Oh. (2015). Effect of Soil Semen Replasemen Ratio on Settlement Reduction *EJGE*, Vol. 20 [2015], Bund. 4.
- Mark Bolton, J. N., Erwin Oh. (2016). Effect of Semen Column Spacing And Replasemen Ratio on Embankment Bearing Capacity: A Queensland Case Study
International Journal of GEOMATE, Oct., 2016, Vol. 11, Issue 26, pp. 2589-2594
Geotec., Const. Mat. & Env., ISSN: 2186-2982(Print), 2186-2990(Online), Japan.
- Minh Ngan Vu , Q. H. L. (2020). Large soil-semen column applications in Vietnam © Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2020.
- Mustafa Fahmi Hasan, H. C. (2022). Physical-mechanical penilaiant of full scale soil semen column conctructed in clay soil. Case Studie in Construction Bahan 16 2022, journal homepag: www.elsevier.com/locate/cscm.
- Nam S. (2011). Determination of the shear strength of unsaturated soils using the multistage direct shear test. *Engineering Geology* 122 (2011) 272–280.
- Natalia Zuievskaya, V. G., and Valentyn Korobiichuk. (2021). Modeling of the effect of a high-pressure jet of semen mortar on the surrounding soil environment when performing jet grouting columns using jet technology *E3S Web of Conferences* 280, 03001, ICSF 2021.
- Nguyen Thai Linh, M. D. N., Pham Hoang Kien. (2020). EXPERIMENTAL STUDY ON THE SETTLEMENT OF SOIL SEMEN COLUMN COMBINED HIGH

- STRENGTH GEOGRID *Transport and Communications Science Journal*, Vol 71, Issue 2 (02/2020), 101-112.
- Nguyen Thai Linh, N. D. M., Nguyen Hai Ha. (2021). ANALYSIS OF IMPACTING FACTORS FOR SOIL-SEMENT COLUMN COMBINED HIGH STRENGTH GEOGRID. *Transport and Communications Science Journal*, Vol. 72, Issue 1 (01/2021), 9-15.
- Pengpeng Ni, Y. Y., Songyu Liu. (2019). Bearing capacity of composite ground with soil-ment columns under earth fills: Physical and numerical modeling Elsevier B.V. on behalf of The Japanese Geotechnical Society.
- Pham Van Ngoc, B. T., Jinsong Huang , Geserard Kelly. (2017). Long-term strength of soil-ment columns in coastal areas. Production and hosting by Elsevier B.V. on behalf of The Japanese Geotechnical Society.
- Plaxis. (2004). Finite Element Code for Soil and Rock Analyses.
- Prakash K. G, A. K. (2022). Stability of Embankment Constructed on Soft Soil Treated with Soil–Sement Columns. *Transportation Infrastructure Geotechnology* <https://doi.org/10.1007/s40515-022-00237-3>.
- Promisco PT, Bauer Pratama Indonesia PT, (2016). Document Review Design Deep Soil Mixing Jalur KA Purwokerto-Kroya Soil Investigation Report.
- Ramzi Taha, A. A.-R., Ali AI-Harthy, and Hilal AI-Siyabi. (2001). USE OF CEMENT BY-PASS DUST IN SOIL STABILIZATION
- Radoslaw L. Michalowski, F. A., Andrzej Wojtasik, Adam Duda, Antoni Florkiewicz, and Dowon Park, S.M.ASCE. (2018). Failure and Remedy of Column-Supported Embankment: Case Study. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 2018, 144(3): 05017008
- Raja S. Madhyannapu , A. J. P. (2015). “Design and Construction Guidelines for Deep Soil Mixing to Stabilize Expansive Soils” *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*
- Raju, V. R. (2015). Ground Improvement Techniques For Keretapi Embankments. Keller Grundbau GmbH, Technical paper 10-59E.
- Rui Rui, P. D., Jie Han, Ph.D., P.E., F.ASCE, S. J. M. van Eekelen, Ph.D., and Yi Wan. (2019). Experimental Investigation of Soil-Archiving Development in

- Unreinforced and Geosynthetic-Reinforced Pile-Supported Embankments J. Geotech. Geoenviron. Eng., 2019, 145(1): 04018103.
- Ryohei Ishikuraa, N. Y., Michael J. Brownb. (2016). An estimation method for predicting final konsolidasi settlement of ground improved by floating soil semen columns, The Japanese Geotechnical Society. Production and hosting by Elsevier B.V. All rights reserved.
- S. Pongsivasathit, P. V. a. J. C. C. (2017). Settlement-time curve calculation of soil-semen column and slab improved soft clay deposit Lowland Technology International 2017; 19 (2): 99-110 International Association of Lowland Technology (IALT): ISSN 1344-9656.
- S.J.M. van Eekelen, A. B., A.F. van Tol. (2015). Validation of analytical models for the design of basal reinforced piled embankments Geotextiles and Geomembranes Isipadu 43, Issue 1, February 2015, Pages 56-81.
- Salisa Chaiyaput, N. A., Namthip Kingnoi, Trong Nghia-Nguyen, Jiratchaya Ayawanna. (2022). Effect of perawatan conditions on the strength of soil semen Case Studies in Construction Bahans, Isipadu 16, June 2022, Elsevier.
- Samuel Jonah Abbey, S. N., Barisua Ebenezer Ngekepe. (2015). Understanding the Performance Of Deep Mixed Column Improved Soils -A Review INTERNATIONAL JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND TECHNOLOGY (IJCIET), Isipadu 6, Issue 3, March (2015), pp. 97-117.
- Scuhanics B, D. A. (2013). Development of Automatic Control of Multi Stage Triaxial Test at The University of Miskolc. Geosciences and Engineering, Vol. 2, No. 3 (2013), pp. 37-43.
- Simon, B. (2012). General report S5 Rigid Inclusions and Stone Columns. ISSMGE - TC 211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI Brussels May 31st & June 1st 2012.
- Suthan Pooranampillai, P. D., Edmonton, Dominic Parmantier. Karen Dawson, P.E. and Seungcheol Shin. (2012). A CASE HISTORY ON THE DESIGN, CONSTRUCTION, AND FIELD QUALITY CONTROL OF SEMEN DEEP SOIL MIXING

- Thanakorn Chompoorat, T. T., Anupong Khamplod, Suched Likitlersuang. (2022). Improving mechanical properties and shrinkage cracking characteristics of soft clay in deep soil mixing. *Construction and Building Bahans*, Isipadu 316, 17 January 2022, 125858 Elsevier
- V. R. Raju, A. A., A. Arulgambar. (2010). Ground Treatment using Dry Deep Soil Mixing for a Keretapi Embankment in Malaysia Keller (M) Sdn. Bhd, Ranhill,.

PROPOSAL

I. JUDUL PENELITIAN :

**PARAMETER TANAH KOMPOSIT DARI MODEL KOLOM TANAH SEMEN
PADA LAPISAN TANAH DASAR *DOUBLE TRACK* KERETA API DI ATAS
TANAH LEMPUNG LUNAK**

II. PERSONNAL

DR. Ir. Idrus M. Alatas M.Sc (Team Leader- ISTN)
Ir. Antonius Setiawan M.BA (Ph.D Candidate UTM- PT.BPI)
Ir. Yuama I Basarah Ph.D (PT. BAUER Pratama Indonesia)
Ir. Wawan Kusmaya MT (Dosen S-1- ISTN)
Marco Ibrahim ST (Mahasiswa Magister Teknik Sipil ISTN)
Randityo Suryoputro Widiutomo ST (PT. BAUER Pratama Indonesia)

III. PERIODE PENELITIAN

1 November 2021 hingga 31 Maret 2023

IV. BIAYA PENELITIAN

Rp. 110.000.000,- (Seratus sepuluh juta rupiah)

V. LOKASI PENELITIAN

Jakarta dan Kroya (Jawa Tengah)

PT.BPI - PIHAK KEDUA



(Antonius Setiawan MBA)

Jakarta , Desember 2021

Team Teader a/n PIHAK PERTAMA



(DR. Ir. Idrus M Alatas M.Sc)

BIAYA PENELITIAN

No	Kegiatan	Unit	Volume	Harga Satuan	Harga
I	PERSIAPAN				
	Pengadaan Steel Box Sampler	box	12	125,000	1,500,000
	Pengadaan Steel Cube Sampler	spl	180	25,000	4,500,000
	Pengadaan Terpal Tenda	unit	1	250,000	250,000
	Pengadaan Cube soil Cement	set	1	400,000	400,000
	Pengadaan Alat Tulis- Kertas	ls	1	200,000	200,000
	Pengadaan Wooden Box Sample	table	3	350,000	1,050,000
					-
II	SITE SURVEY Kroya I				-
	Sewa Mobil Box	hr	6	400,000	2,400,000
	Bensin dan Tol	ls	1	1,200,000	1,200,000
	Operator CPT	md	6	200,000	1,200,000
	Operator Test Pit	md	6	250,000	1,500,000
	Sewa Mesh	ls	1	2,000,000	2,000,000
	Pengujian Shallow Bor	ttk	2	600,000	1,200,000
	UDS Sampline	tb	4	250,000	1,000,000
	AkOmodasi	ls	1	4,000,000	4,000,000
					-
III	Laboratorium Testing I				-
	Test Properties Lengkap	tb	4	750,000	3,000,000
	Triaxial SCC Sample Model	test	180	150,000	27,000,000
	Diect Shear Sample Model	test	180	100,000	18,000,000
					-
IV	SITE Investigation ke-2				-
	Bor Dalam @ 10 meter	m	5	400,000	2,000,000
	SPT @ 1 m	test	50	150,000	7,500,000
	UDS Sampling @ 1 m	tb	50	200,000	10,000,000
	Sewa Kendaraan	ls	1	2,000,000	2,000,000
	Akomodasi	ls	1	4,000,000	4,000,000
V	Olah Data				
	Triaxial SCC Sample Model	test	50	50,000	2,500,000
	Diect Shear Sample Model	test	50	50,000	2,500,000
VI	Biaya Jurnal International Q-4 Scopus	ls	1	9,100,000	9,100,000
	TOTAL BIAYA			Rp	110,000,000

SURAT PERJANJIAN KEGIATAN PENELITIAN

No: 36/SPKP/J/XI/2021

Hari ini Senin Tanggal Satu November Tahun Dua Ribu Dua Puluh Satu, kami yang bertandatangan di bawah ini:

1. Ir. Syahril Taufik, M.Sc.Eng, Ph.D, Ketua LPPM – ISTN dalam hal ini bertindak sebagai Ketua Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat berdasarkan SK. Rektor No: 027/01.1-A/VIII/2021, selanjutnya disebut sebagai **PIHAK PERTAMA**,
2. Ir. Antonius Setiawan M.BA Direktur Utama PT. Bauer Pratama Indonesia dalam hal ini bertindak sebagai Direktur Utama PT. Bauer Pratama Indonesia Perusahaan pondasi dan perbaikan tanah, sebagai sponsor terlaksananya penelitian dan selanjutnya disebut sebagai **PIHAK KEDUA**.

Kedua belah pihak bersepakat untuk membuat kontrak penelitian bersama berdasarkan nota kesepahaman (MoU) antara Kepala LPPM-ISTN dengan PT. Bauer Pratama Indonesia No:.002/02.1-JP/II/2021 tertanggal 8 Februari 2021, sebagai berikut:

Pasal 1

Tugas dan Kewajiban

PIHAK PERTAMA atas nama Lembaga LPPM-ISTN bertugas mengkoordinir pelaksanaan penelitian yang bekerja sama dengan **PIHAK KEDUA**, dan bertanggung jawab menunjuk kooordinator (team leader) yang akan memimpin hingga terlaksananya penelitian bersama dengan **PIHAK KEDUA**.

PIHAK KEDUA bertugas memfasilitasi seluruh kebutuhan finansial yang akan ditetapkan bersama para Pihak didalam proposal penelitian, dan berkewajiban mengikutkan personalnya dalam kegiatan penelitian ini.

Pasal 3

JUDUL PENELITIAN

PIHAK PERTAMA dalam jabatannya menerima tugas kepada **PIHAK KEDUA** untuk melaksanakan kegiatan Penelitian dengan Judul Penelitian:

“PARAMETER TANAH KOMPOSIT DARI MODEL KOLOM TANAH SEMEN PADA LAPISAN TANAH DASAR *DOUBLE TRACK* KERETA API DI ATAS TANAH LEMPUNG LUNAK”.

Pasal 3

PERSONALIA PENELITI

Personalia peneliti pada penelitian ini terdiri dari personal yang masing-masing mewakili para Pihak. Susunan personalia penelitian sebagai berikut:

Peneliti: Dr. Ir. Idrus M. Alatas M.Sc (ISTN-Team Leader)

Ir. Antonius Setiawan M.BA (Ph.D Candidate UTM- PT.BPI)

Ir. Wawan Kusmaya MT (Dosen S-1- ISTN)

Marco Ibrahim ST (Mahasiswa Magister Teknik Sipil ISTN)

Ir. Yuama I Basarah Ph.D (PT. Bauer Pratama Indonesia)

Randityo Suryoputro Widiutomo ST (PT. Bauer Pratama Indonesia)

Pasal 4

WAKTU, BIAYA PENELITIAN, CARA PEMBAYARAN

1. Waktu penelitian adalah 15 (lima belas bulan) terhitung bulan November 2021- hingga Maret 2023.
2. Biaya penelitian yang telah disetujui para Pihak dibebankan kepada Para Pihak, dengan rincian Pihak Pertama sebesar 25% dan Pihak Kedua sebesar 75%.
3. Biaya penelitian yang disetujui sebesar Rp.110.000.000,- (Seratus Sepuluh Juta Rupiah) sesuai rincian terlampir.
4. Pembayaran dilakukan sebagai berikut:

- a. Tahap pertama sebesar 40% kontribusi dari Pihak Kedua atau Rp.44.000.000,- (empat puluh empat juta rupiah) setelah ditandatanganinya kontrak penelitian oleh kedua belah pihak
- b. Tahap kedua 25 % kontribusi dari Pihak Kedua sebesar Rp. 27.500.000,- (dua puluh tujuh juta lima ratus ribu rupiah) setelah menyerahkan laporan sementara pertama pelaksanaan penelitian kepada pihak Pertama disertai berita acara. .
- c. Tahap kedua 25 % kontribusi dari Pihak Pertama sebesar Rp. 27.500.000,- (dua puluh tujuh juta lima ratus ribu rupiah) setelah seluruh pekerjaan pengujian di laboratorium dan pengolahan data serta laporan penelitian selesai dikerjakan, disertai berita acara.
- d. Tahap ke empat 10% sebesar Rp. 11.000.000 (sebelas juta rupiah) setelah publikasi penelitian berupa jurnal internasional bereputasi dengan status diterima (acceptance).

Pasal 5

PEMANTAUAN PENELITIAN

1. **PIHAK PERTAMA** akan menugaskan Ketua Tim Peneliti (Team Leader) dari Staf Pengajar ISTN, yang selanjutnya Team Leader diberi kewenangan untuk menyusun personalia anggota paneliti yang mewakili dari personalia **PIHAK PERTAMA** dan **PIHAK KEDUA**
2. Biaya penelitian yang diberikan oleh **PARA PIHAK** sesuai Pasal 4 akan digunakan oleh Team Leader dan anggotanya untuk membiayai penelitian ini. Team Leder bertanggung jawab atas laporan keuangan terhadap **PIHAK PERTAMA** dan akan melaporkannya sesuai dengan Pasal 4 Surat Perjanjian ini.
3. **PIHAK PERTAMA** berhak untuk:
 - a. Melakukan pengawasan administrasi, monitoring dan evaluasi terhadap pelaksanaan penelitian.
 - b. Memberi sanksi, jika dalam pelaksanaan penelitian terjadi pelanggaran terhadap isi perjanjian oleh peneliti.
 - c. Bentuk sanksi disesuaikan dengan tingkat pelanggaran yang dilakukan.

4. Pelaksanaan pemantauan penelitian dijadwalkan sesuai jadwal pelaksanaan penelitian.

Pasal 6

LAPORAN HASIL PENELITIAN

1. **PIHAK PERTAMA** wajib menyerahkan laporan hasil penelitian kepada **PIHAK KEDUA** paling lambat 2 (dua) minggu setelah pelaksanaan penelitian dilakukan, sebanyak 3 (tiga) eksemplar.
2. Laporan Hasil penelitian dicetak dikertas A4 dengan sampul warna biru tua, dan dibawah sampul muka ditulis: Dibiayai oleh PT. Bauer Pratama Indonesia dan ISTN dengan no. kontrak: 36/SPKP/J/XI/2021
3. Berkas-berkas Laporan penelitian terdiri dari:
 - a. *Hardcopy* Laporan penelitian yang terdiri dari:
 - Laporan penelitian
 - Naskah Publikasi penelitian
 - b. Laporan hasil penelitian dibuat rangkap 3 (tiga), dengan rincian; 1 (satu) eksemplar untuk Perpustakaan ISTN, 1(satu) eksemplar untuk LPPM-ISTN dan 1 (satu) eksemplar untuk PT. Bauer Pratama Indonesia.
 - c. Naskah publikasi dalam format jurnal sebanyak 2 eksemplar yang terpisah dari laporan akhir hasil penelitian. Naskah publikasi tersebut (dalam bentuk *hardcopy* dan *softcopy*) ini disiapkan untuk publikasi di jurnal external/international
 - d. CD atay *Flash Disk* berisi file laporan lengkap dan naskah publikasi sebanyak 1 keping.

Pasal 7

HAK KEPEMILIKAN ATAS BARANG/PERALATAN PENELITIAN

Segala barang atau alat yang dibeli atas biaya penelitian menjadi milik peneliti yang bersangkutan. Pengaturan kepemilikannya sebagai berikut:

1. Barang atau alat berupa *flash disk*, printer, alat perekam, akses internet, dan sejenisnya pada dasarnya tidak dianggarkan dalam biaya pengabdian selama masih dapat menggunakan fasilitas ISTN.
2. Kamera, alat perekam, dan semacamnya yang dapat dipakai ulang, buku, jurnal, CD, VCD, DVD, *cassete*, dan sejenisnya yang merupakan *software*, program, alat atau referensi pengabdian yang didapatkan (dibeli) dari anggaran penelitian menjadi milik peneliti. Pemindahan hak kepemilikan barang atau alat sebagaimana tersebut dilakukan melalui PIHAK PERTAMA.

Pasal 8

Sanksi

Segala kelalaian baik disengaja maupun tidak, sehingga menyebabkan keterlambatan menyerahkan laporan hasil pengabdian dengan batas waktu yang telah ditentukan akan mendapatkan sanksi sebagai berikut:

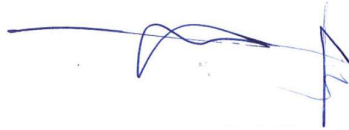
1. **PIHAK PERTAMA** diberi kesempatan perpanjangan waktu penelitian selama 4 (empat) bulan setelah waktu yang ditentukan.
2. Jika setelah masa perpanjangan tersebut **PIHAK PERTAMA** tidak dapat menyelesaikan penelitiannya, **PIHAK PERTAMA** diwajibkan mengembalikan dana yang sudah diterima kepada **PIHAK KEDUA** dengan cara:
 - a. Mengembalikan tunai kepada **PIHAK KEDUA** atau
 - b. Menyerahkan** tunai kepada Lembaga Sosial / Amal yang ditetapkan oleh **PIHAK KEDUA**.

Pasal 9
PENUTUP

Perjanjian ini berlaku sejak ditandatangani dan disetujui oleh **PIHAK PERTAMA**
dan **PIHAK KEDUA**.

Jakarta, 1 November 2021

PIHAK PERTAMA



Ir. Syahril Taufik, M.Sc.Eng, Ph.D

PIHAK KEDUA



Ir. Antonius Setiawan MBA

The Performance of a Double Track Railroad Embankment Using Deep Soil Mixing

Antonius Setiawan¹, Samira A. Kamaruddin¹, Ramli Nazir¹, Idrus M. Alatas², Yuamar I. Basarah^{3,*}

¹UTM Razak School of Engineering and Advanced Technology, Universiti Teknologi Malaysia, Malaysia

²Institut Sains dan Teknologi Nasional, Indonesia

³Faculty of Civil and Environmental Engineering, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

Received June 5, 2023; Revised September 23, 2023; Accepted October 12, 2023

Cite This Paper in the Following Citation Styles

(a): [1] Antonius Setiawan, Samira A. Kamaruddin, Ramli Nazir, Idrus M. Alatas, Yuamar I. Basarah, "The Performance of a Double Track Railroad Embankment Using Deep Soil Mixing," *Civil Engineering and Architecture*, Vol. 12, No. 1, pp. 168 - 177, 2024. DOI: 10.13189/cea.2024.120114.

(b): Antonius Setiawan, Samira A. Kamaruddin, Ramli Nazir, Idrus M. Alatas, Yuamar I. Basarah (2024). *The Performance of a Double Track Railroad Embankment Using Deep Soil Mixing*. *Civil Engineering and Architecture*, 12(1), 168 - 177. DOI: 10.13189/cea.2024.120114.

Copyright©2024 by authors, all rights reserved. Authors agree that this article remains permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License

Abstract Embankment construction in a very soft clay layer for transportation projects is common in many areas in Indonesia. One of them is the construction of a new double-track connecting Purwekerto and Kroya in Central Java. However, the challenge of this project was the existing track that must continue to operate while the new embankment was constructed. The project requirement was to limit the impact of the new tracks during construction on the stability and settlement of the existing railway embankment. Therefore, deep soil mixing (DSM) ground improvement technique with grid spacing was selected to increase the bearing capacity of the existing soil and reduce the settlement of the embankment. Numerical simulations using a 2D finite element program were performed to evaluate the performance of the deep soil mixing method in terms of factor of safety and settlements. The results showed that the stability of the embankment during static and seismic conditions satisfies the requirements. The settlements caused by the construction of the new embankment were remained within the allowable settlement during the construction and operational conditions. The deep soil mixing has successfully improved the stability of the embankment and limited the deformation of the existing railway track constructed on soft ground conditions; hence the train continued to operate during the construction.

Keywords Soft Clay, Deep Soil Mixing, Ground Improvement, Double Track Railway

1. Introduction

With the increasing demand for transportation networks, more railways have been built in Indonesia to expand the line capacity for future traffic in Central Java. A double-track railway connecting Purwokerto and Kroya, with a total length of approximately 27 km, was constructed to improve economic development in the region. The new double-track was built on top of very soft ground, with low bearing capacity and a highly compressible layer. These tracks were constructed adjacent to an existing track that was still in operation during the construction. This condition led to a challenging design and method of embankment construction for the new double-track built on top of soft soil while maintaining the operation of the existing track. Therefore, a suitable ground improvement technique is required to provide more stable ground conditions for constructing the embankment.

This paper evaluates the performance of ground improvement using deep soil mixing (DSM) under the embankment of a new double track adjacent to an existing operating track. The evaluation was performed using numerical simulations to assess the performance of the improved ground and the stability of the embankment system for both new and existing railroad tracks. The existing project situation and ground conditions were

outlined first. The selection of the ground improvement solution was described and followed by the design criteria of the project. The design analysis is then explained to cover both static and seismic conditions. The project documentation is presented to demonstrate the performance of the new double-track embankment system. Finally, the conclusion and recommendations are described to provide practicing engineers with a review into the most impactful geotechnical aspects of the project.

operating track is shown in Figure 1. The old embankment height in the center is approximately 2.3 m, with a total width of 14 m at the base. Since the existing track was planned to be replaced, a higher embankment for the new tracks was proposed to fill the old embankment with a total height of 5.3 m. The design of the embankment system for the new double track is shown in Figure 2.

2. Project Description

2.1. Existing Conditions

An embankment of about 1.3 km of the existing railway track was built on a rice field area overlying a very soft alluvial deposit. To increase traffic capacity, a new double track was constructed to replace the existing track. However, during construction, the prior track must continue to operate as a transportation system connecting Purwokerto and Kroya. The existing condition of the



Figure 1. Existing railway track condition

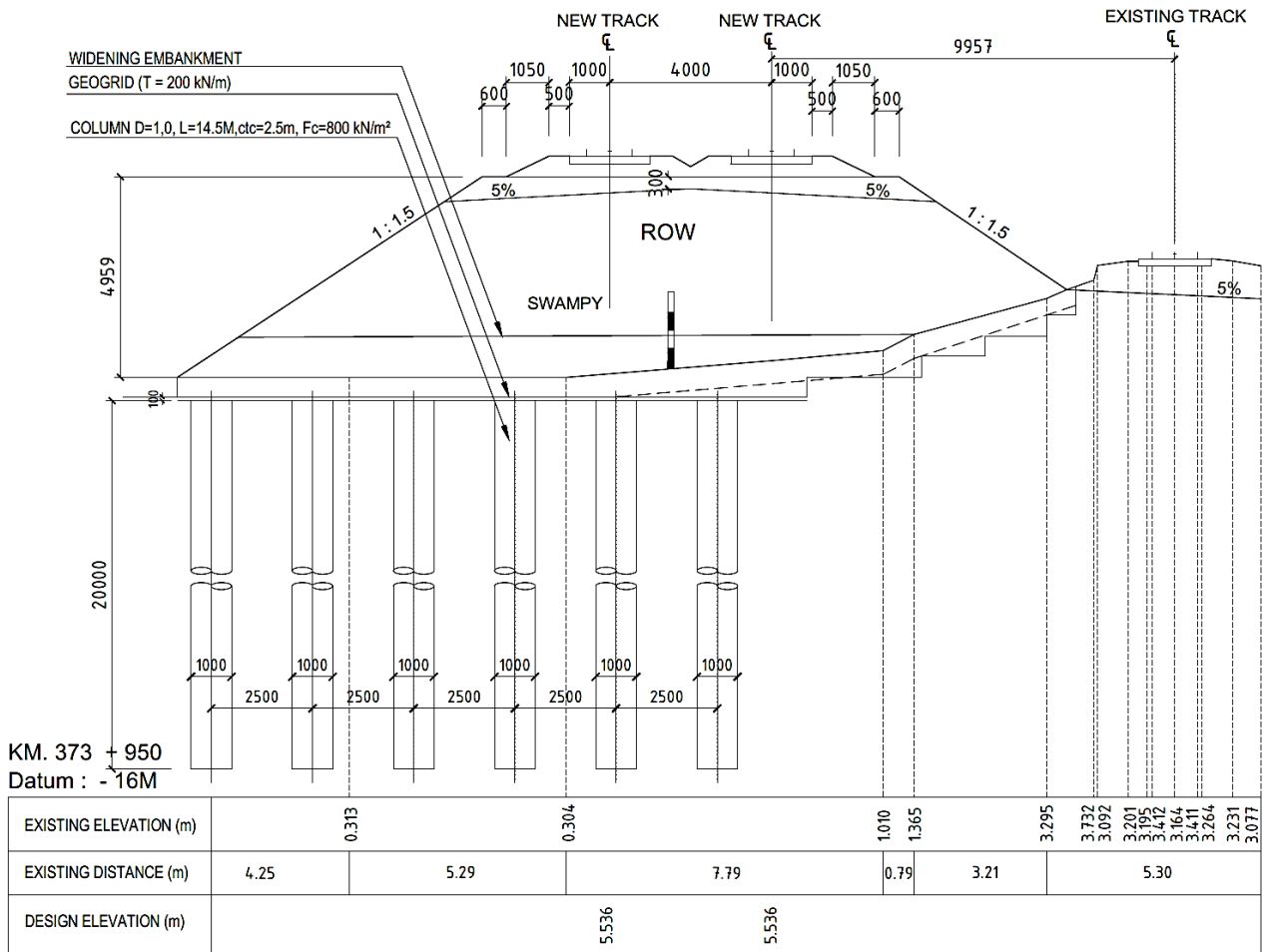


Figure 2. Typical cross-section of the new double-track embankment system (STA 373+950)

2.2. Soil Ground Information and Properties

Based on soil investigation data from borings and cone penetration testing (CPT), the soil profile of the area consists of an average thickness of 11 m, very soft to soft silty clay with an NSPT of 1-2 and overlying of about 10 m of medium dense to dense silty sand with an NSPT of 5-20. This sandy layer is underlain by stiff to hard silty clay with NSPT of more than 20. In the middle of the rice field from STA 378+800 to STA 373+950, a 7m soft to medium silty clay with NSPT ranging between 2 and 10 was present

between very soft clay and stiff clay layers to represent the weakest ground condition in the project area. Figure 3 shows an idealized soil profile based on the available in situ soil and laboratory test results. For this paper, a more refined soil profile was selected to analyze the soil profile interpreted from CPT test results. The first very soft clay layer based on the boring logs was subdivided into two sublayers of clay. Therefore, four layers were defined for analysis: 1) Very soft to soft clay, 2) Soft to medium stiff clay, 3) Medium stiff clay, and 4) Stiff clay.

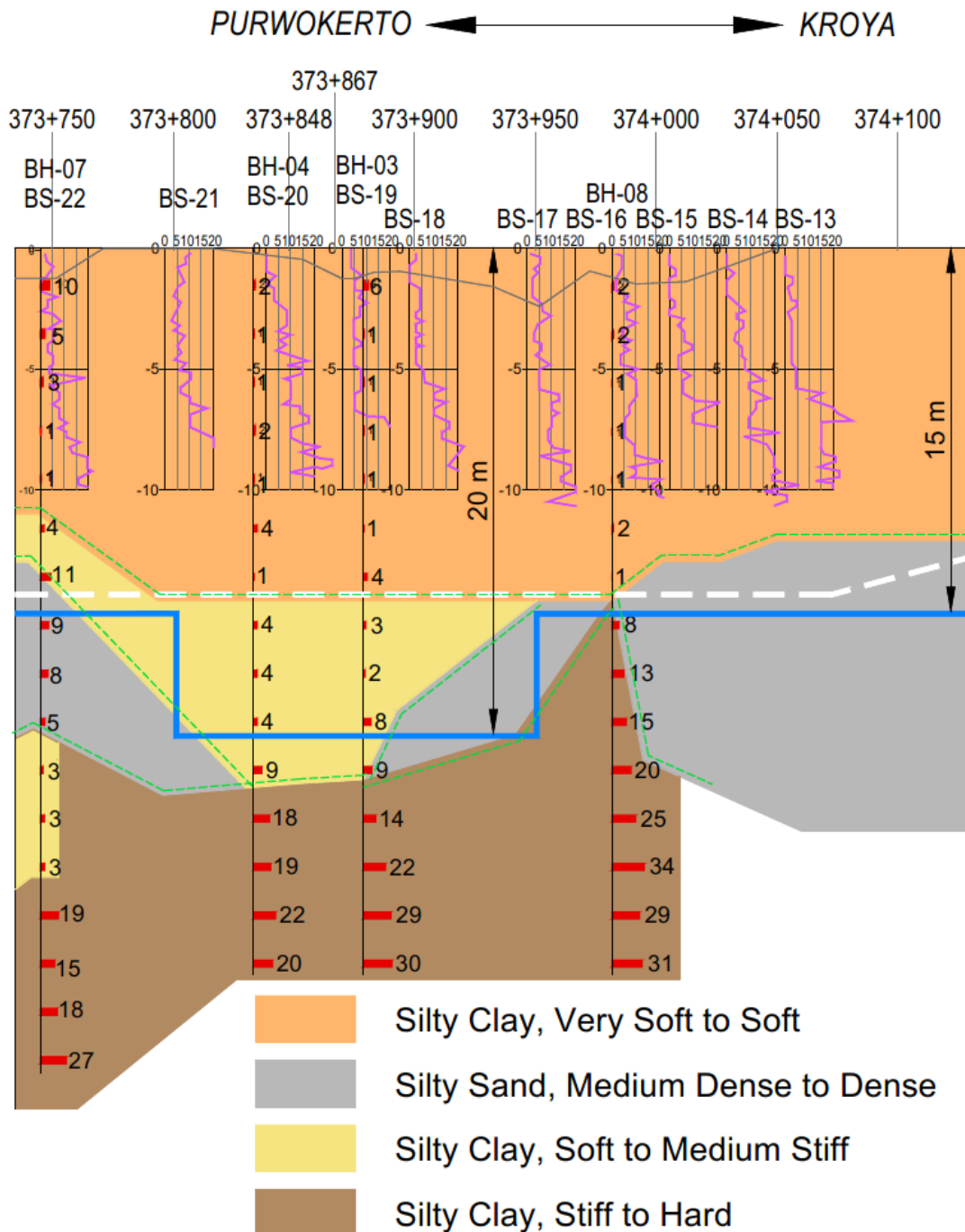


Figure 3. Soil profile

For the design, the soil parameters were obtained based on laboratory test results and on common practice soil parameter correlations. The undrained shear strength for the soft clay layer was determined from the CPT test results using the following formula,

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{N_{kt}} \quad (1)$$

where q_t is cone resistance, σ_{vo} is total overburden stress, and N_{kt} is a cone-bearing factor. According to [1, 2], N_{kt} is in the range of 10-20. For soft clay, N_{kt} is in the range of 10-15 [3]. However, to account for the uncertainty in using mechanical cone penetration tests, a higher $N_{kt} = 18$ was selected for this study. For medium and stiff clay layers, the undrained shear strength was defined using S_u -NSPT correlation as $S_u = 6 \text{NSPT}$, which is commonly used in Indonesia [4, 5]. The effective parameters of cohesion and friction angle were defined having a shear strength value consistent with the average undrained shear strength in the soft silty clay layer. The compressibility parameters were determined using an oedometer test for the settlement evaluation.

2.3. Project Challenges

Due to the requirement of keeping the operation of the existing track during the construction of the new double track, the impact on the stability of the existing track should be minimized. The maximum settlement of the new double track is also limited to 10 cm/year according to the specifications. The specification also requires that the minimum factor of safety for embankment stability is 1.5 and 1.1 for static and seismic conditions [6]. These criteria for both existing and new railway tracks governed the selection of ground improvement techniques for the embankment system built on soft ground conditions and became the technical challenge of this project.

3. Ground Improvement Technique

In this study, deep soil mixing (DSM) was selected as the ground improvement technique because of its several advantages over other techniques. Soil improvement using a prefabricated vertical drain (PVD) was not an option because consolidation could lead to additional deformation of the existing embankment. The project's time constraint is a disadvantage of using PVD. Vibro replacement using stone columns was also considered. However, the intensity of loading for a 5-m embankment with train loading requires high stiffness of the improved ground to satisfy the global stability requirement of the embankment system. Therefore, deep soil mixing was selected to ensure good stability for both existing and new embankments.

Deep soil mixing has been extensively used as a ground improvement technique to increase soil-bearing capacity and reduce the settlement of embankments [7-9]. The improvement in the bearing capacity of the mixed column

is due to the increase in shear strength. The increase in undrained shear strength of the composite soft soil is a result of the contribution of two shear resistances: cementation and fabric [10]. The chemical reactions between cement and soil cause the hardening of the materials and hence increase the shear strength. An increase in strength can be observed in the long term because of the continuous pozzolanic reaction months or years after mixing [11]. The main factors affecting the strength of the improved soil were summarized in [12]. Physical and chemical properties of the native soil, binder properties, mixing conditions, and curing conditions are among these factors. The applications of DSM range from transportation foundations and embankments to liquefaction mitigation. The use of DSM for railway embankments was successfully demonstrated in another study [13-16]. However, the DSM technique in these studies was implemented only for a new embankment. Additionally, there was still limited research evaluating the embankment's performance using DSM ground improvement under seismic loading. Therefore, this case study in this paper showed a unique case study of the DSM installed next to an existing operating track, not only for static condition, but also the seismic condition.

4. Numerical Modeling Approaches

4.1. Numerical Procedures

2D numerical analysis was performed using the finite element software PLAXIS 2D [17] to evaluate the stability of the embankment. Seven cross-sections were considered in this project, depending on the geologic conditions. In this paper, the most critical cross-section (STA 373+950) with the weakest soil profile is discussed. Initially, stability analysis was performed by evaluating the critical failure surface which could be either the new embankment or the existing one. The very soft clay layer was modeled using a soft soil constitutive model to better represent the compressibility of very soft soil, whereas the underlying soft to medium silty clay was modeled using the hardening soil model. Undrained "A" type of analysis was selected for both layers with effective input parameters for both strength and stiffness. The stiffer layers of silty clay below a depth of 14 m were modeled using the Mohr-Coulomb model with Undrained "B" analysis using the total stress strength and effective stiffness parameters.

The material of the embankment was sandy soil and hence modeled as drained materials using the Mohr-Coulomb. Similarly, the same constitutive model was used for the ballast and sub-ballast layers. Train loading was applied as a static load of 15 kPa. The soil domain size in the plane strain model was 110 m wide with a total depth of 30 m to ensure that the lateral boundary was unaffected by deformation in the embankment system. Table 1 lists the input soil parameters for the numerical

model of STA 373+950.

The numerical simulation was performed at several simplified steps to represent the construction stages in the field. The initial stress state of the existing condition, including the presence of the old railway track embankment, was determined using gravity loading analysis, including train loading on the existing track. Deep soil mixing was then activated to represent the ground improvement work. One layer of geogrid with a tensile strength of 200 kN/m was installed on the top of the DSM to increase the embankment stability. A new complete embankment, which included sub-ballast and ballast layers, was then built in one stage. Finally, train loading was applied on the new railway track while deactivating the train loading of the old track.

4.2. Ground Improvement Using DSM

The ground improvement using DSM was designed under the new embankment, as shown in Figure 2. The diameter of DSM was 1 m with 2.5 spacing in between soil cement mixing or equivalent to a replacement ratio of

12.6%. The rectangular grid spacing of an individual column was selected for the DSM configuration to optimize the stability of the embankment on soft ground. The length of the DSM was 20 m to cover the entire depth of the very soft and medium stiff silty clay layers. To model the DSM in the finite element model, a composite soil cluster was used to represent the equivalent strength ($c_{composite}$) and stiffness parameters ($E_{composite}$) using the following formula [13]:

$$E_{composite} = E_{soil}(1 - \alpha) + (E_b \times \alpha) \quad (2)$$

$$c_{composite} = \frac{c_{soil}(s^2 - 0.25\pi D^2) + c_b(0.25\pi D^2)}{s^2} \quad (3)$$

With the target compression strength of $f_c=0.8$ Mpa, the calculated composite shear strength and stiffness for the very soft clay layer were $Su_{composite}=400$ kPa and $E_{composite}=110000$ kPa. In the numerical model, the DSM was modeled using Mohr-Coulomb constitutive model with Undrained B analysis. An illustration of the calculation of the composite strength parameter is shown in Figure 4, and the complete numerical model of section STA 373+900 is shown in Figure 5.

Table 1. Input soil parameters

Soil layer	Depth	Model	γ_t	Su	c'	Φ'	E_{s0}'	$C_c; C_r$
	m		kN/m ³	kPa	kPa		kPa	
Ballast		MC drained	20	-	0	38	20000	-
Sub-ballast		MC drained	20	-	1	35	25000	-
Embankment		MC drained	18	-	10	35	20000	-
Very Soft Silty Clay	0-7	Soft Soil Undrained A	14	-	14	24	-	0.8; 0.08
Medium Stiff Clay (1)	0-7	Hardening Soil, Undrained A	14	-	14	24	-	0.4; 0.03
Medium Stiff Clay (2)	7-14	Hardening Soil, Undrained A	14	-	14	26	30000	-
Stiff Clay	14-25	Hardening Soil, Undrained B	17.7	50	-	-	30000	-
Very Stiff Clay	> 25	Hardening Soil, Undrained B	18	120	-	-	36000	-

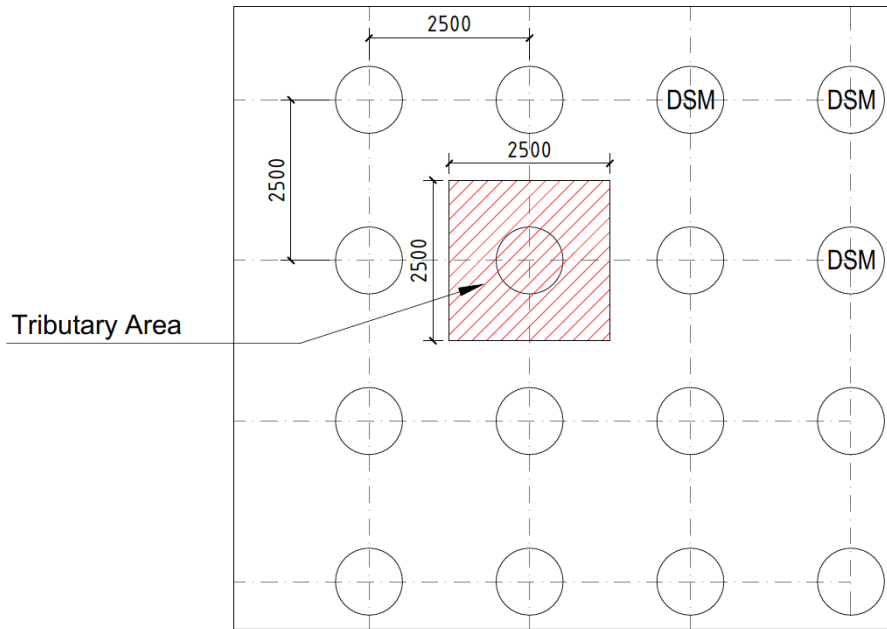


Figure 4. DSM configuration

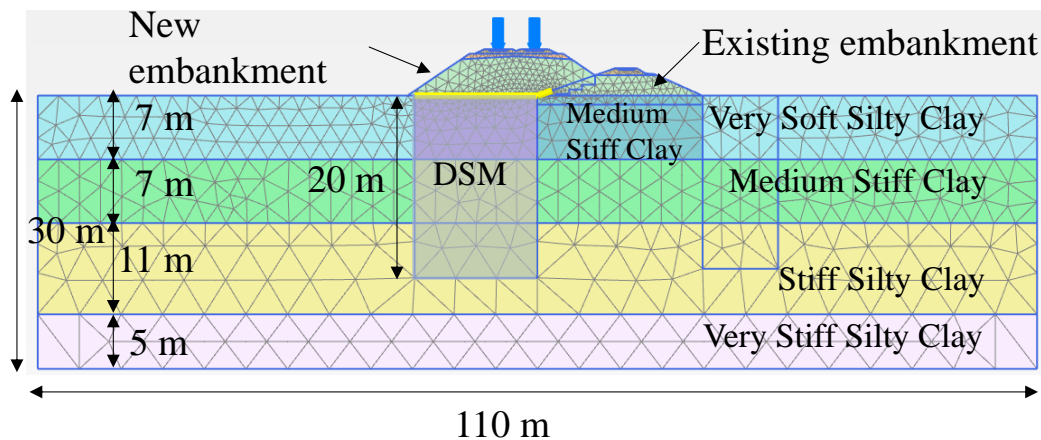


Figure 5. Initial 2D Numerical model of STA 383+950

4.3. Numerical Results

The stability of the new railway embankment was evaluated under operational conditions. The safety factor of the embankment was about 1.84, and the failure surface was developed toward the existing embankment, as shown in Figure 6. This indicated that the influence of the higher new embankment was significant on the stability of the old embankment. Additional shear stresses induced in the very soft silty clay layer under the existing embankment led to a lower safety factor compared to that failure surface toward the new embankment, indicating that the 20 m long DSM column improved the stiffness and bearing capacity of the ground underneath the new embankment.

Figure 7 shows the surface settlements at the center of the new left track, new right track, and old track. During the construction of the new embankment and completion of

the ballast layer, the settlement of the old track is negligible, implying that the DSM effectively limits the impact on the existing embankment. When the new tracks were opened for operating, the left and right tracks settled about 2 cm respectively, whereas the old track experienced a slight uplift due to the inactive track with the removal of the train load. The residual settlements at the top of the tracks were evaluated at 95% of consolidation. The left track settles only approximately 3 cm, while the new right track and the old one settle to about 10 and 12 cm, respectively. Larger settlements for the right and existing tracks were observed because DSM was not extended below the existing embankment due to the active railway. However, since the old track is no longer active, then the settlement of the right track still complies with the settlement requirement of 10 cm.

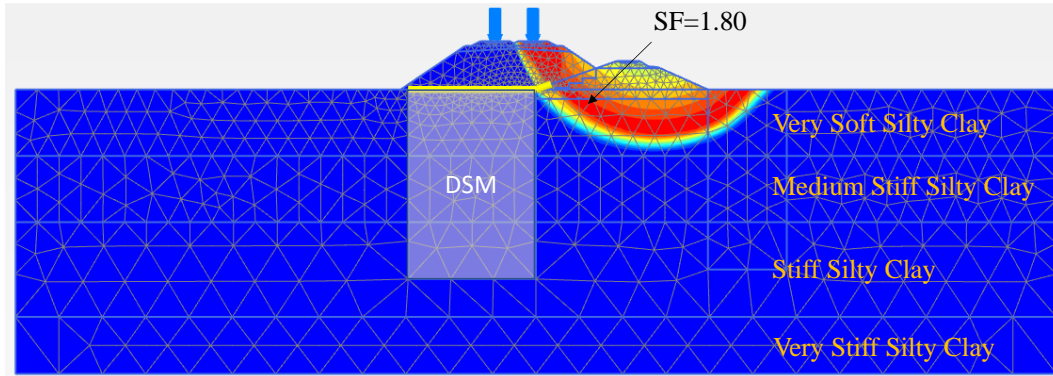


Figure 6. Failure surface of the embankment

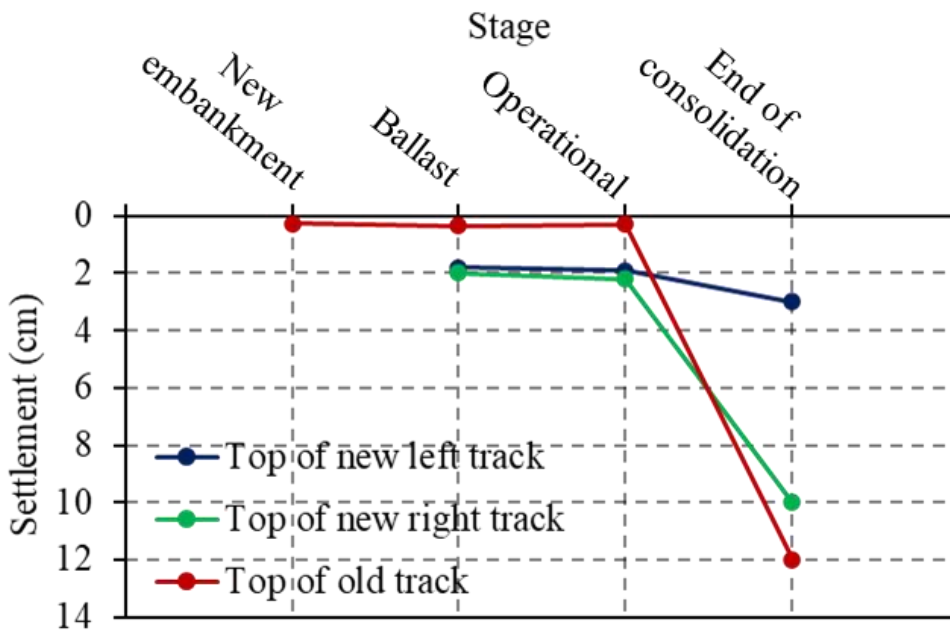


Figure 7. Settlement of the new and old embankments

4.4. Seismic Performance

Because Purwokerto is located in Central Java, which is considered a seismically active region, the embankment’s stability must be evaluated against seismic loading. According to the national standard of Indonesia for geotechnical works, SNI-8460-2017, for embankment systems, seismic loading should be based on an earthquake with a 500-year return period. Based on the hazard map of PGA with a probability of exceedance of 10% in 50 years (i.e., 500-year return period), the PGA at the project site is between 0.25-0.30g as shown in Figure 8 [18].

Seismic evaluation for the embankment was performed using a pseudo-static approach by assigning 0.27 as the

acceleration coefficient (k_h) in the numerical model. The SNI code of Indonesia allows the use of a coefficient factor of 0.5 as a reduction of PGA applied on the embankment [19]. Therefore, for this site, $k_h = 0.135$. A minimum safety factor of 1.1 is required for the stability of an embankment under seismic loading. Pseudostatic analysis was performed for two horizontal directions to the new and existing railroad embankments. Figure 9 and Figure 10 show the failure surface contours of the embankment under seismic conditions for the stability toward the old and new embankments with the factor of safety of 1.18 and 1.63, respectively. The presence of DSM effectively cuts the failure surface and reduces the impact of pseudo-static loading.

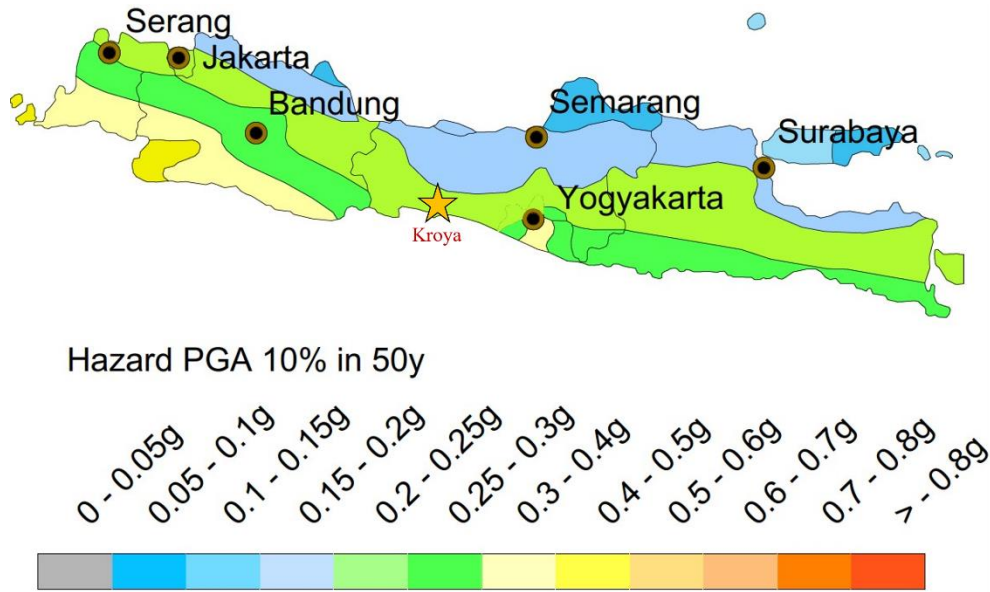


Figure 8. Seismic hazard map of PGA with a probability of exceedance of 10% in 50 years [18]

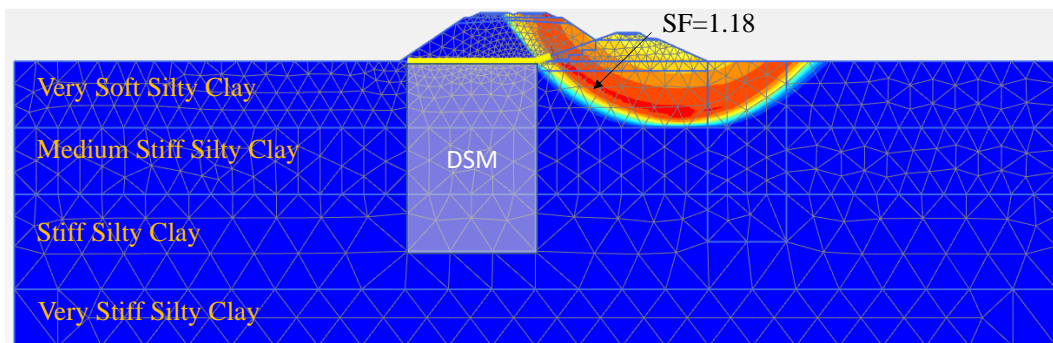


Figure 9. Failure surface towards the old embankment during the seismic condition

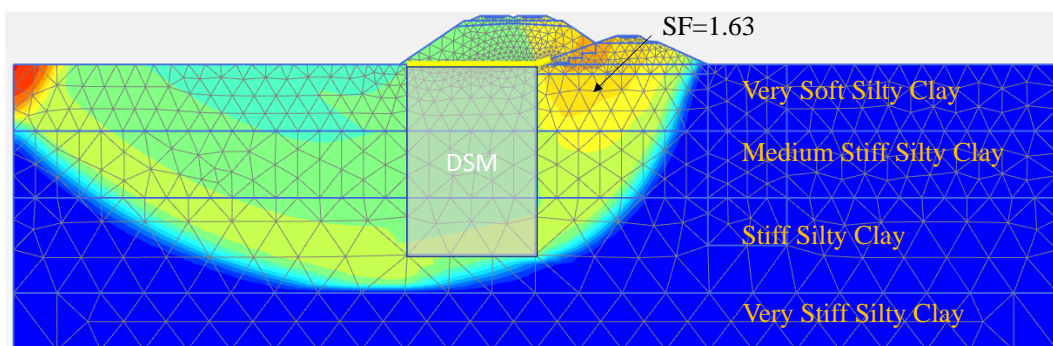


Figure 10. Failure surface towards the new embankment during the seismic condition

5. Construction

A total of 2803 soil cement columns with a diameter of 1 m were constructed in a rectangular grid with 2.5 m spacing to improve the bearing capacity of the soft saturated clays and to limit the settlements under the proposed new double railroad track. The column length varied along the alignment from 9 m up to 20 m. The same

mix design was used for all columns. The Single-Column-Mixing technique was used to construct soil cement columns using a drilling rig Bauer BG-14. The ground is drilled and mixed by the mixing tool, which is rotated continuously until the design depth. Simultaneously, the slurry was pumped to create a soil-cement column. While rotating, the mixing tool was then withdrawn from the ground to finish one column

installation. The type of binder was Ordinary Portland Cement (OPC) to achieve 0.8 MPa compressive strength. Using one drilling rig, the productivity of this method was 500 m/day/rig, allowing the completion of all columns within approximately three months. Figure 11a and Figure 11b show the process of drilling and installation of soil-cement mixing next to the existing railroad track. One of the challenges of the construction was that the groundwater level reached the surface of the working platform during the rainy season. To ensure the characteristics of soil-cement mixing, all the installation processes were monitored comprehensively. The drilling rig was equipped with GPS to ensure the exact location of the column and connected to the internet to allow live monitoring in order to adjust the volume and composition of the slurry depending upon the soil conditions encountered during the installation. The comparison between before and after completion of the new double-track is shown in Figure 12.



a)



b)

Figure 11. a) Installation of soil-cement mixing, b) Drilling process on top of the saturated working platform



a)



b)

Figure 12. a) Train passing the old railway track during the construction of new double track, b) Completed new double-track

6. Implication for Engineering Practice

The study case of the ground improvement technique at the double track railway connecting Kroya and Purwekerto shows the effectiveness of deep soil mixing in improving soil bearing capacity and limit settlement. The railway track that was still in operation during construction was the challenge of the project. DSM was able to satisfy the project requirements to minimize the effects of the new double-track construction on the old railroad track embankment. The study case also highlighted the importance of the seismic stability evaluation not only on one side of the new track embankment, but also on the other side of the old embankment. The improved bearing capacity of the ground under the new embankment provided an additional stability to the old embankment. The DSM technique may be used to increase the stability of an embankment constructed on top of very soft ground due to the relatively rapid construction of soil columns at a productivity rate of approximately 40 columns/day. The mixed ground condition of soil and cement increases the stiffness and strength of the ground to create a composite soil layer.

7. Conclusions

A new double track was constructed connecting Purwokerto and Kroya to improve the line capacity. The new embankment of the railway track was built on top of soft clay layers with an average thickness of 14 m. The challenge of the project was to construct this double track while keeping the operation of the old railroad track. With the side-by-side condition of the embankments, the project required minimum settlement and stability of both embankments to ensure a minimum impact of the new construction on the existing track. Ground improvement using deep soil mixing was selected as an efficient and effective method to improve the stability and limit the embankment deformation. A total of 2803 columns with a diameter of 1 m were installed in 2.5 m grid spacing. Based on the numerical simulations, the factor of the safety of the embankment system was 1.6 and 1.1 for static and seismic conditions. This case study implies that deep soil mixing can be effectively used for embankment construction in very soft ground with small settlement criteria.

Acknowledgements

The authors would like to express their gratitude to PT. Bauer Pratama Indonesia and PT. Promisco Sinergi Indonesia for providing the data for this paper.

REFERENCES

- [1] H. E. Low, T. Lunne, K. H. Andersen, M. A. Sjurson, X. Li, and M. F. Randolph, "Estimation of intact and remoulded undrained shear strengths from penetration tests in soft clays," *Géotechnique*, vol. 60, pp. 843-859, 2010, DOI: 10.1680/geot.9.P.017.
- [2] T. Lunne, J. J. Powell, and P. K. Robertson, *Cone penetration testing in geotechnical practice*: CRC Press, 2002.
- [3] P. Mayne and J. Peuchen, "Evaluation of CPTU Nkt cone factor for undrained strength of clays," in *Cone Penetration Testing 2018*, ed: CRC Press, 2018, pp. 423-429.
- [4] A. Lim, V. H. Batistuta, and Y. V. C. Wijaya, "Finite Element Modelling of Prestressed Concrete Piles in Soft Soils, Case Study: Northern Jakarta, Indonesia," in *Journal of the Civil Engineering Forum*, 2022, pp. 21-30.
- [5] B.-C. B. Hsiung, K.-H. Yang, W. Aila, and L. Ge, "Evaluation of the wall deflections of a deep excavation in Central Jakarta using three-dimensional modeling," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 72, pp. 84-96, 2018/02/01/ 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.11.013>.
- [6] B. S. Nasional, "Persyaratan Perancangan Geoteknik, SNI 8460-2017," Badan Standarisasi Nasional. Jakarta, 2017.
- [7] D. T. Bergado, T. Ruenkraitersa, Y. Taesiri, and A. S. Balasubramaniam, "Deep soil mixing used to reduce embankment settlement," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, vol. 3, pp. 145-162, 1999, DOI: 10.1680/gi.1999.030402.
- [8] A. S. A Rashid, A. R. Bunawan, and K. N. Mat Said, "The Deep Mixing Method: Bearing Capacity Studies," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 35, pp. 1271-1298, 2017/08/01 2017, DOI: 10.1007/s10706-017-0196-x.
- [9] V. R. Raju and J. Daramalinggam, "Ground improvement: principles and applications in Asia," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, vol. 165, pp. 65-76, 2012, DOI: 10.1680/grim.10.00033.
- [10] S. Horpibulsuk, N. Miura, and D. T. Bergado, "Undrained Shear Behavior of Cement Admixed Clay at High Water Content," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 130, pp. 1096-1105, 2004, DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:10(1096).
- [11] D. Bergado, "Soil compaction and soil stabilisation by admixtures," in *Proceeding of the seminar on ground improvement application to Indonesian soft soils*. Indonesia: Jakarta, 1996, pp. 23-26.
- [12] M. P. Moseley and K. Kirsch, *Ground improvement*: CRC Press, 2004.
- [13] A. Arulrajah, A. Abdullah, M. W. Bo, and A. Bouazza, "Ground improvement techniques for railway embankments," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, vol. 162, pp. 3-14, 2009, DOI: 10.1680/grim.2009.162.1.3.
- [14] D. Tan, G. Per, M. Hans, and L. Jan, "Railway embankment behaviour due to increased axle loads - A numerical study," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 710, p. 012040, 2021, DOI: 10.1088/1755-1315/710/1/012040.
- [15] C. Djan, "Deep Mixing for Support of Approach Embankments for Light Rail Overcrossing in Urban Setting," pp. 585-593, 2012, DOI: 10.1061/978078441235.0.0044.
- [16] M. Topolnicki, "General overview and advances in Deep Soil Mixing," in *XXIV geotechnical conference of torino design, construction and controls of soil improvement systems*, 2016, pp. 25-26.02.
- [17] R. Brinkgreve, S. Kumarswamy, W. Swolfs, D. Waterman, A. Chesaru, and P. Bonnier, "PLAXIS 2016," PLAXIS bv, the Netherlands, 2016.
- [18] M. Irsyam, P. R. Cummins, M. Asrurifak, L. Faizal, D. H. Natawidjaja, S. Widiyantoro, *et al.*, "Development of the 2017 national seismic hazard maps of Indonesia," *Earthquake Spectra*, vol. 36, pp. 112-136, 2020, DOI: 10.1177/8755293020951206.
- [19] B. S. Nasional, "Persyaratan perancangan geoteknik," Badan Standarisasi Nasional, Jakarta, SNI 8460:2017, 2017.