

PERBAIKAN TANAH LEMPUNG LUNAK METODA *PRELOADING* PADA PEMBANGUNAN INFRASTRUKTUR TRANSPORTASI DI PULAU KALIMANTAN

Wahyu P. Kuswanda

Anggota HATTI No. 00.0601.AZ

Direktur PT. Teknindo Geosistem Unggul

Gedung Wisma SIER, Lantai 1, Jl. Rungkut Industri Raya No.10 Surabaya 60293

Telp. : 031-8475062 Faks. : 031-8475063 Website : www.geosistem.co.id

E-mail: wahyu@geosistem.co.id

Abstrak

Problema utama pembangunan infrastruktur transportasi pada tanah lempung lunak (*soft clay*) adalah daya dukung tanah dasarnya yang relatif rendah dan pemampatan tanah dasarnya yang relatif besar serta berlangsung relatif lama. Apabila tanpa dilakukan perbaikan pada tanah dasarnya terlebih dahulu maka infrastruktur transportasi yang dibangun berpotensi akan mengalami kerusakan sebelum mencapai umur yang direncanakan. Untuk menanggulangi problema tersebut salah satu dari beberapa alternatif yang bisa dilakukan adalah melakukan perbaikan tanah dasar metoda *preloading* dengan penggunaan *prefabricated vertical drain* (PVD). Makalah ini menguraikan prinsip-prinsip dasar perbaikan tanah lempung lunak metoda *preloading* dengan penggunaan PVD dan beberapa contoh aplikasinya pada pembangunan infrastruktur transportasi di Pulau Kalimantan. Diberikan juga contoh aplikasi perbaikan tanah lempung lunak metoda *preloading* dengan penggunaan PVD yang menerapkan sistem kontrak berbasis kinerja (*performance based contract*).

Kata kunci : pulau kalimantan, tanah lempung lunak, *preloading*, *prefabricated vertical drain*, instrumen geoteknik

1. PENDAHULUAN

Sekitar 20 juta hektar atau lebih dari 10% luas daratan di Indonesia merupakan tanah lunak yang terdiri dari tanah lempung lunak (*soft clay soil*) dan tanah gambut (*peat soil*). Penyebaran tanah lempung lunak di Indonesia ditunjukkan pada **Gambar 1**. Di Pulau Kalimantan penyebaran tanah lempung lunak berada di Provinsi Kalimantan Utara, Kalimantan Selatan, Kalimantan Timur, Kalimantan Barat maupun Kalimantan Tengah.



■ : tanah lempung lunak

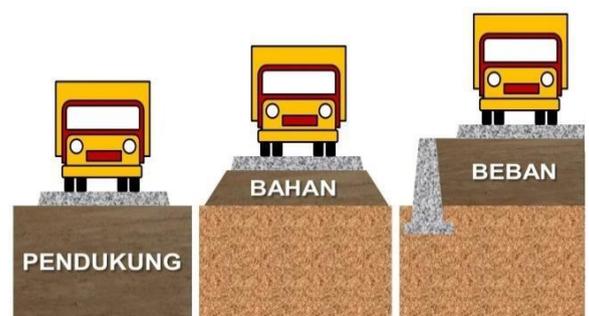
Gambar 1. Penyebaran tanah lempung lunak

Dalam pembangunan infrastruktur transportasi, tanah lempung lunak termasuk tanah yang bermasalah (*problematic soil*) atau tanah yang sulit (*difficult soil*). Oleh sebab itu maka problema atau kesulitan pembangunan infrastruktur trans-

portasi di Pulau Kalimantan yang dibangun pada tanah lempung lunak perlu penanganan khusus.

2. PERAN TANAH PADA BANGUNAN

Tanah memiliki 3 (tiga) peran utama pada bangunan infrastruktur transportasi, yaitu sebagai pendukung, bahan dan beban bangunan infrastruktur transportasi seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2**. Sebagai peran pendukung, tanah harus mempunyai daya dukung yang mampu mendukung bangunan infrastruktur transportasi yang berada di atasnya. Apabila tanah mengalami pemampatan maka penurunan bangunan yang diakibatkannya tidak menyebabkan bangunan infrastruktur transportasi rusak seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 3**.



Gambar 2. Peran tanah pada bangunan



Gambar 3. Syarat tanah pendukung bangunan

3. PROBLEMATIKA LEMPUNG LUNAK

Sebagai pendukung bangunan infrastruktur transportasi, tanah lempung lunak mempunyai karakteristik daya dukung yang relatif rendah dan pemampatannya yang relatif besar serta berlangsung relatif lama. Apabila tanpa dilakukan perbaikan terlebih dahulu maka bangunan infrastruktur transportasi yang dibangun di atasnya berpotensi mengalami kerusakan sebelum mencapai umur konstruksi yang direncanakan.

Pada **Gambar 4** sampai dengan **Gambar 9** ditunjukkan contoh-contoh kerusakan bangunan infrastruktur transportasi yang dibangun pada tanah lempung lunak.



Gambar 4. Kerusakan timbunan badan jalan



Gambar 5. Kerusakan jalan perkerasan lentur



Gambar 6. Kerusakan jalan perkerasan kaku



Gambar 7. Kerusakan oprit jembatan



Gambar 8. Kerusakan konstruksi jembatan



Gambar 9. Kerusakan tiang lampu jalan

Pada **Gambar 5** ditunjukkan kerusakan timbunan tanah badan jalan. Pada **Gambar 5** ditunjukkan kerusakan jalan perkerasan lentur (*flexible pavement*). Pada **Gambar 6** ditunjukkan contoh kerusakan jalan perkerasan kaku (*rigid pavement*). Pada **Gambar 7** ditunjukkan contoh kerusakan oprit jembatan. Pada **Gambar 8** ditunjukkan contoh kerusakan konstruksi jembatan. Pada **Gambar 9** ditunjukkan contoh kerusakan tiang lampu jalan. Contoh-contoh kerusakan tersebut hanyalah sebagian kecil dari kejadian kerusakan infrastruktur transportasi yang dibangun pada tanah lempung lunak.

4. METODA PRELOADING DENGAN PVD

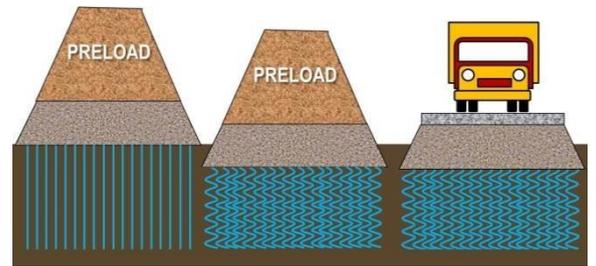
Untuk menanggulangi problema pembangunan infrastruktur transportasi pada tanah lempung lunak, pada **Tabel 1** ditunjukkan beberapa metoda perbaikan tanah dimana untuk tanah lempung lunak metoda perbaikan yang tersedia adalah *preloading (with vertical drain)*, *electro-osmosis*, *vacuum consolidation*, *lightweight fill*, *stone column*, *jet grouting*, *lime columns*, *fracture grouting*, *ground freezing*, *vitrification*, *electrokinetic treatment* dan *electroheating*. Dari berbagai metoda tersebut yang dibahas pada makalah ini hanya metoda *preloading (with vertical drain)* saja.

Tabel 1. Metoda perbaikan tanah

GROUND IMPROVEMENT METHOD	TYPE OF SOIL		GROUND IMPROVEMENT OBJECTIVES				
	GRANULAR	COHESIVE	BEARING CAPACITY	SETTLEMENT CONTROL	LATERAL STABILITY	ENVIRONMENTAL CONTROL	LIQUEFACTION RESISTANCE
Vibrocompaction	√	-	√	√	-	-	√
Dynamic Compaction	√	-	√	√	-	-	√
Blasting	√	-	√	√	-	-	√
Compaction Grouting	√	-	√	√	-	-	√
Preloading / Vertical Drains	-	√	√	√	-	-	√
Electro-osmosis	-	√	√	√	-	-	√
Vacuum Consolidation	-	√	√	√	-	-	√
Lightweight Fill	√	√	√	√	-	-	√
Mechanical Stabilization	√	-	√	√	√	-	√
Soil Nailing	√	-	-	-	√	-	-
Soil Anchoring	√	-	-	-	√	-	-
Micropiles	√	-	√	√	√	-	-
Stone Columns	-	√	√	√	√	-	√
Fiber Reinforcement	√	-	√	√	√	-	-
Permeation Grouting	√	-	√	√	√	-	√
Jet Grouting	√	√	√	√	√	-	√
Deep Soil Mixing	√	√	√	√	√	-	√
Lime Columns	-	√	√	√	√	-	√
Fracture Grouting	-	√	√	√	√	-	√
Ground Freezing	√	√	√	√	√	-	√
Vitrification	√	√	-	-	√	-	-
Electrokinetic Treatment	-	√	-	-	√	-	-
Electroheating	-	√	-	-	√	-	-
Biotechnical Stabilization	√	-	-	-	√	-	-

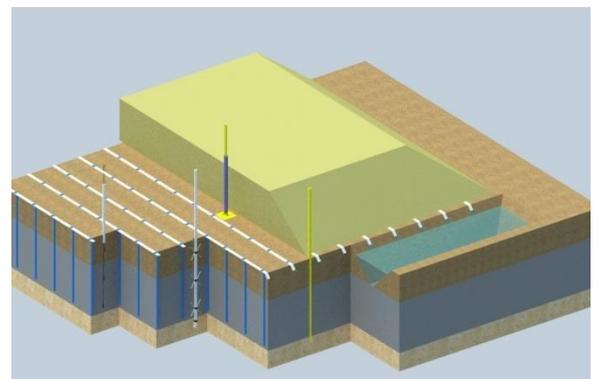
Pada metoda *preloading* dengan PVD (*prefabricated vertical drain*), perbaikan tanah dilakukan dengan cara meletakkan beban (*preload*) pada tanah dasar sesuai dengan beban kerja (*work load*) dan beban konstruksi (*construction load*) yang direncanakan. Durasi pembebanan dilakukan sampai konsolidasi tanah dasar mencapai derajat konsolidasi yang direncanakan. Apabila derajat konsolidasi tanah dasar telah mencapai pada derajat yang direncanakan maka *preload* dibongkar dan konstruksi dimulai pelaksanaan-

nya. Ilustrasi metoda *preloading* dengan penggunaan PVD ditunjukkan pada **Gambar 10**.



Gambar 10. Prinsip *preloading* dengan PVD

Perbaikan tanah lempung lunak metoda *preloading* dengan PVD merupakan satu sistem perbaikan tanah yang terdiri dari pekerjaan *preload*, PVD, *horizontal drain* dan instrumen geoteknik seperti yang ditunjukkan **Gambar 11**. *Preload* berfungsi untuk memampatkan tanah dasar. PVD berfungsi untuk mempercepat proses pemampatan tanah. *Horizontal drain* berfungsi untuk mengalirkan air pori dari PVD ke arah horizontal ke luar timbungan *preload*. Instrumen geoteknik berfungsi untuk memantau proses dan mengetahui kinerja hasil perbaikan tanah yang telah dilakukan.



Gambar 11. Sistem *preloading* dengan PVD

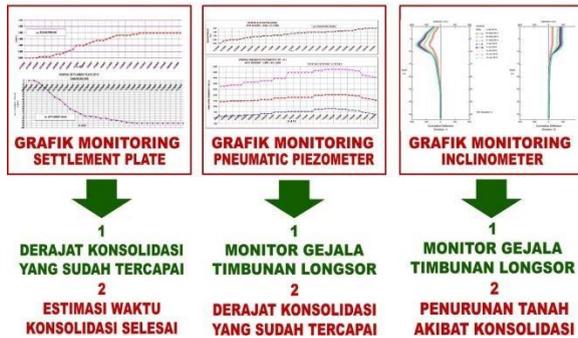


Gambar 12. Proses *preloading* dengan PVD

Pada perbaikan tanah lempung lunak metoda *preloading* dengan PVD, *input*-nya adalah tanah yang mudah mampat (*compressible soil*), selanjutnya dilakukan aktivitas percepatan pemam-

patan (*consolidation acceleration*) dan menghasilkan *output* berupa tanah yang relatif selesai pemampatannya (*non-compressible soil*).

Kinerja pekerjaan perbaikan tanah lempung lunak metoda *preloading* dengan penggunaan PVD diketahui dari evaluasi hasil monitoring instrumen geoteknik, baik selama proses maupun setelah pekerjaan selesai dilaksanakan. Evaluasi monitoring instrumen geoteknik menghasilkan informasi seperti pada **Gambar 13**.

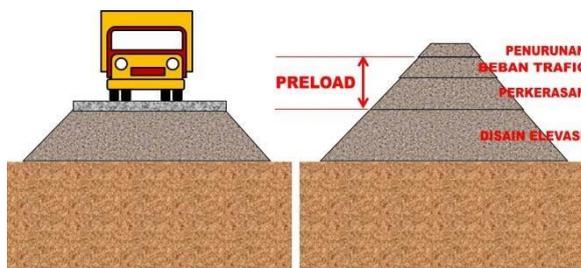


Gambar 13. Evaluasi instrumen geoteknik

5. PERENCANAAN PEKERJAAN

5.1. Perencanaan Timbunan *Preload*

Salah satu hal penting yang menentukan keberhasilan metoda *preloading* dengan PVD adalah dalam hal perencanaan timbunan *preload*. *Preload* harus direncanakan sesuai dengan beban konstruksi (*construction load*) dan beban kerja (*work load*) yang akan berada di atas tanah dasar. *Output* hasil perencanaan *preload* berupa data berat jenis (γ) dan tinggi timbunan *preload*.



Gambar 14. Perencanaan timbunan *preload*

Misalnya beban konstruksi (perkerasan jalan) sebesar $1,25 \text{ ton/m}^2$ dan beban kerja (lalu-lintas) $1,86 \text{ ton/m}^2$ maka apabila digunakan tanah timbunan dengan berat jenis (γ) sebesar $1,75 \text{ ton/m}^3$ direncanakan tinggi timbunan *preload* sebesar 1,77 meter. Timbunan *preload* setinggi 1,77 meter itulah yang dibongkar apabila konsolidasi tanah dasar telah mencapai sesuai dengan

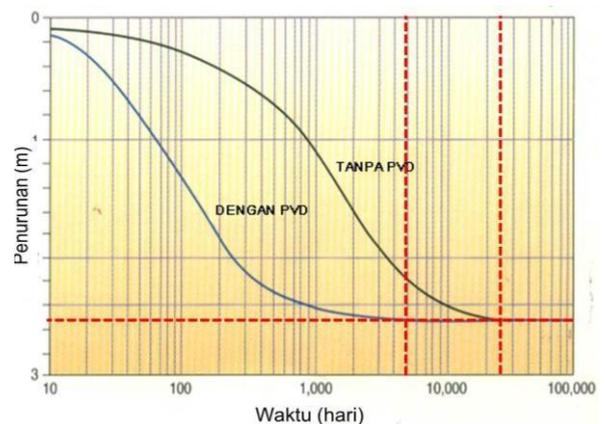
yang direncanakan ($U_r > 90\%$). Selanjutnya digantikan dengan beban yang sama, yaitu beban konstruksi (perkerasan jalan) sebesar $1,25 \text{ ton/m}^2$ dan beban kerja (lalu-lintas) $1,86 \text{ ton/m}^2$.

5.2. Perencanaan PVD

PVD (*prefabricated vertical drain*) merupakan salah satu produk geosintetik (*geosynthetic products*) yang berfungsi sebagai pengalir air (*drainage*). PVD merupakan material komposit yang terdiri dari inti (*core*) dan penyaring (*filter*) seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 15**. Fungsi PVD pada pekerjaan perbaikan tanah lempung lunak metoda *preloading* dengan penggunaan PVD adalah untuk mempercepat waktu proses konsolidasi seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 16**.



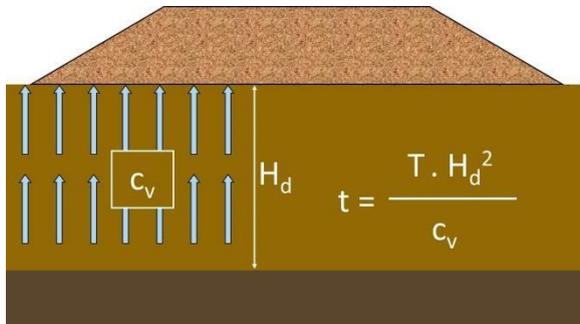
Gambar 15. Material PVD



Gambar 16. Fungsi PVD

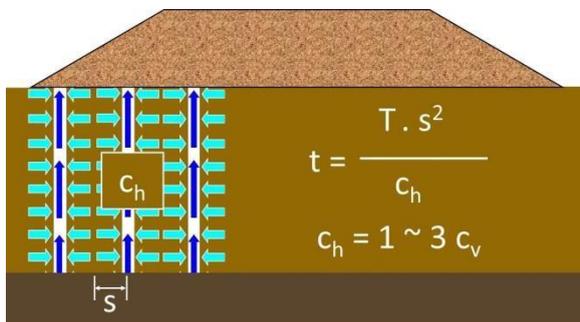
PVD dapat mempercepat waktu konsolidasi dikarenakan PVD dapat memperpendek jarak pengaliran air pori. Apabila tanpa menggunakan PVD, waktu konsolidasi tanah lempung lunak diilustrasikan seperti pada **Gambar 17**. Air pori mengalir ke arah vertikal sesuai dengan besarnya koefisien konsolidasi vertikal (C_v) sepan-

jang tebal lapisan tanah lunak (H_d). Waktu konsolidasi (t) ditentukan oleh besarnya kuadrat dari tebal lapisan tanah lunak (H_d) dibagi dengan koefisien konsolidasi vertikal (C_v).



Gambar 17. Proses konsolidasi tanpa PVD

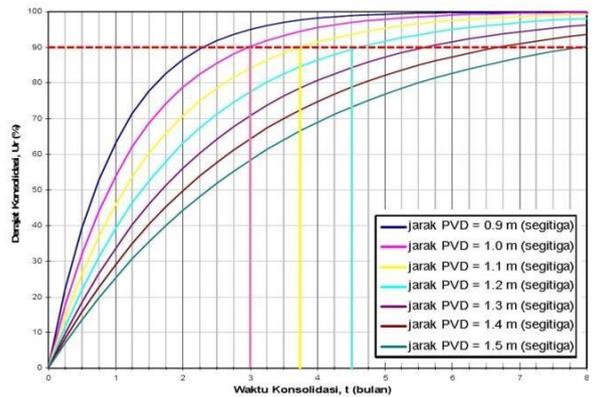
Apabila digunakan PVD, waktu konsolidasi tanah lempung lunak diilustrasikan seperti pada Gambar 18. Air pori mengalir ke arah horisontal sesuai dengan besarnya koefisien konsolidasi horisontal (C_h) sepanjang setengah dari jarak pemasangan PVD (s). Waktu konsolidasi (t) ditentukan oleh besarnya kuadrat dari setengah jarak pemasangan PVD (s) dibagi dengan koefisien konsolidasi horisontal (C_h).



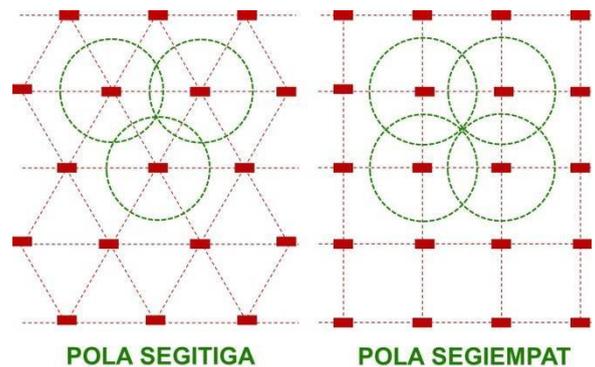
Gambar 18. Proses konsolidasi dengan PVD

Misalnya pada tanah lempung lunak setebal 10 meter tidak digunakan PVD dan waktu konsolidasinya selama 100 tahun, apabila digunakan PVD dengan jarak 2 meter dan nilai $C_h = 2C_v$ maka waktu konsolidasinya akan dipercepat 200 kalinya menjadi 0,5 tahun saja. Pada Gambar 19 ditunjukkan grafik hubungan antara derajat dan waktu konsolidasi untuk beberapa alternatif jarak pemasangan PVD, dimana semakin pendek jarak pemasangan PVD akan semakin cepat waktu konsolidasinya.

Ada 2 (dua) macam pola pemasangan PVD, yaitu pola segitiga (*triangular pattern*) dan pola bujur sangkar (*square pattern*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 20.



Gambar 19. Jarak PVD dan waktu konsolidasi



Gambar 20. Pola pemasangan PVD

Proses konsolidasi terjadi pada tanah yang mempunyai kemampumampatan yang tinggi (*compressible soil*). Oleh karena PVD berfungsi untuk mempercepat proses konsolidasi maka PVD dipasang sepanjang tebal lapisan tanah yang mempunyai kemampumampatan yang tinggi saja. Untuk menentukan suatu tanah mempunyai kemampumampatan yang tinggi dan mengetahui berapa tebalnya, dapat digunakan tabel konsistensi tanah kohesif pada Tabel 2.

Tabel 2. Konsistensi tanah kohesif

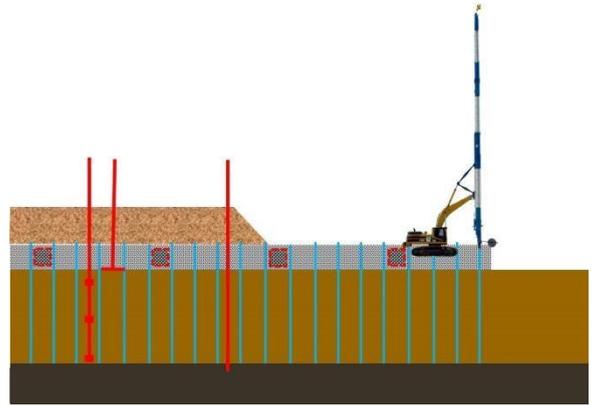
KONSISTENSI TANAH KOHESIF	TAKSIRAN NILAI SPT N-SPT	TAKSIRAN HARGA TAHANAN KONUS, qc	
		kg /cm ²	kPa
Sangat lunak (<i>very soft</i>)	0,0 – 2,5	0 – 10	0 – 1.000
Lunak (<i>soft</i>)	2,5 – 5,0	10 – 20	1.000 – 2.000
Menengah (<i>medium</i>)	5,0 – 10	20 – 40	2.000 – 4.000
Kaku (<i>stiff</i>)	10 – 20	40 – 75	4.000 – 7.500
Sangat kaku (<i>very stiff</i>)	20 – 40	75 – 150	7.500 – 15.000
Keras (<i>hard</i>)	> 40	> 150	>15.000

Sumber : Mochtar (2006), Revisi (2012)

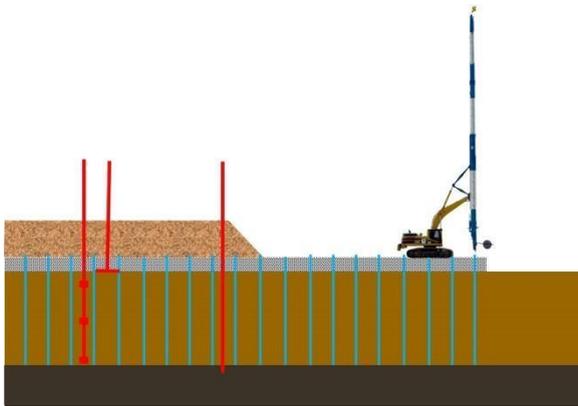
Tanah kohesif yang berkemampumampatan tinggi adalah tanah yang dominan mengandung lanau (*silt*) dan lempung (*clay*) dengan konsistensi sangat lunak (*very soft*), lunak (*soft*) dan menengah (*medium*). Dalam praktek, biasanya ditentukan dengan nilai $N-SPT \leq 10$ atau nilai $qc \leq 40$ kPa.

5.3. Perencanaan *Horizontal Drain*

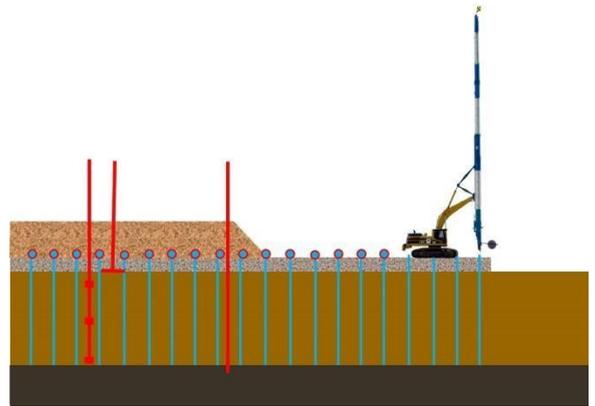
Drainase horisontal (*horizontal drain*) diperlukan untuk mengalirkan air pori secara horisontal yang berasal dari PVD. Ada berbagai macam alternatif *horizontal drain* yang bisa digunakan, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 21** sampai **Gambar 26**. Pada **Gambar 21** ditunjukkan alternatif *horizontal drain* dengan menggunakan pasir. Pada **Gambar 22** dengan menggunakan pasir dan 1 lapis *geotextile* di bawahnya. Pada **Gambar 23** dengan menggunakan pasir dan 2 lapis *geotextile* di bawah dan di atas pasir.



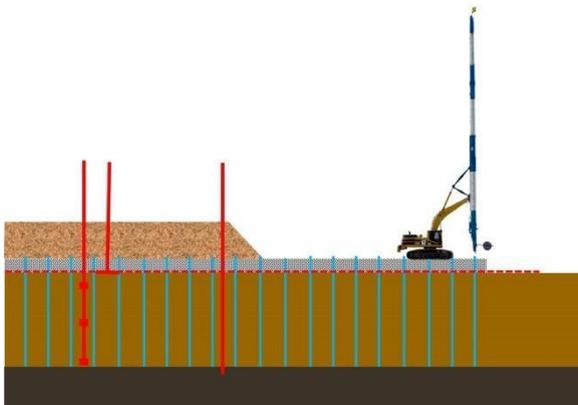
Gambar 24. Penggunaan kerikil dan *geotextile*



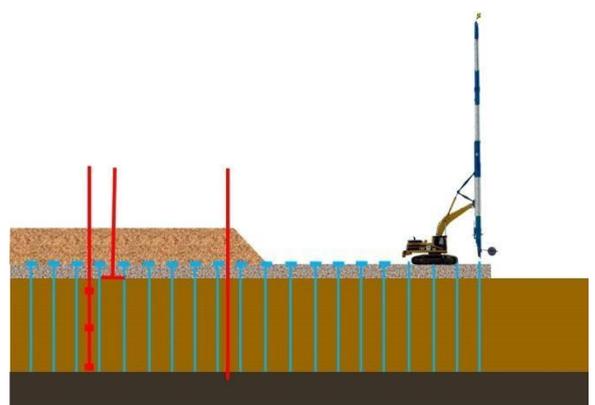
Gambar 21. Penggunaan pasir



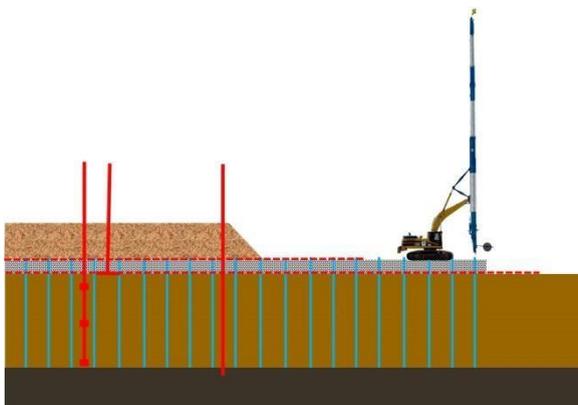
Gambar 25. Penggunaan pipa dan *geotextile*



Gambar 22. Penggunaan pasir dan 1 *geotextile*



Gambar 26. Penggunaan PHD



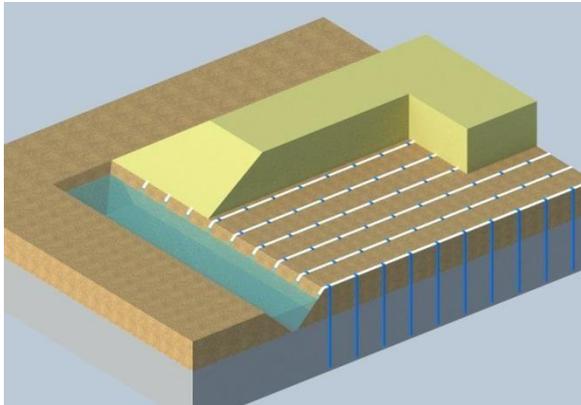
Gambar 23. Penggunaan pasir dan 2 *geotextile*

Apabila permeabilitas pasir sangat kecil dan untuk membuat *horizontal drain* yang lebih tebal memerlukan biaya yang tinggi maka di dalam pasir tersebut dipasang *subdrain* yang dibuat dari kerikil yang dibungkus *geotextile* seperti pada **Gambar 24**. Apabila untuk penggunaan pasir biayanya sangat tinggi maka *horizontal drain* dibuat dari pipa berlubang (*perforated pipe*) yang dibungkus *geotextile* seperti pada **Gambar 25**. Sebagai alternatif pengganti pipa berlubang (*perforated pipe*) yang dibungkus *geotextile* digunakan *prefabricated horizontal drain* (PHD) seperti pada **Gambar 26**.

PHD (*prefabricated horizontal drain*) merupakan salah satu produk geosintetik (*geosynthetic products*) yang berfungsi sebagai pengalir air (*drainage*). PHD merupakan material komposit yang terdiri dari inti (*core*) dan penyaring (*filter*) seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 27**. Bentuk PHD menyerupai bentuk PVD namun lebih tebal dari PVD karena fungsi PHD pada pekerjaan perbaikan tanah lempung lunak metoda *preloading* dengan penggunaan PVD adalah untuk menampung dan mengalirkan air yang berasal dari beberapa ujung PVD seperti pada **Gambar 28**.



Gambar 27. Material PHD



Gambar 28. Fungsi PHD

5.4. Perencanaan Instrumen Geoteknik

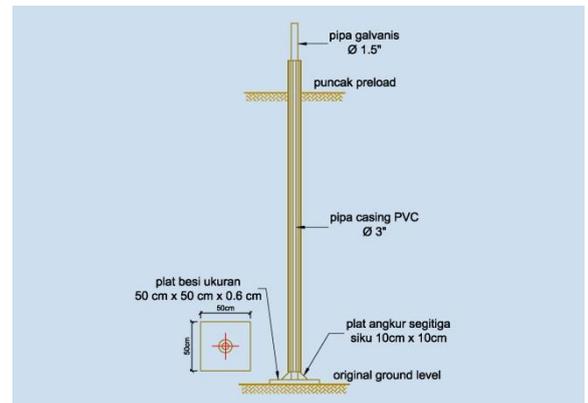
Pemasangan instrumen geoteknik (*geotechnical instrument*) pada pekerjaan perbaikan tanah lempung lunak metoda *preloading* dengan penggunaan PVD berfungsi untuk monitoring proses pelaksanaan selama pekerjaan berlangsung dan mengetahui kinerja hasil pekerjaan perbaikan tanah yang telah selesai dilakukan.

Berikut ini hanya diuraikan beberapa instrumen geoteknik saja, yaitu *settlement plate*, *extensometer*, *piezometer* dan *inclinometer*.

Yang dimaksud dengan material *settlement plate* adalah seperti yang ditunjukkan **Gambar 29**. *Settlement plate* berfungsi untuk mengetahui penurunan yang terjadi pada permukaan tanah, dimana pemasangannya seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 30**.



Gambar 29. Material *settlement plate*

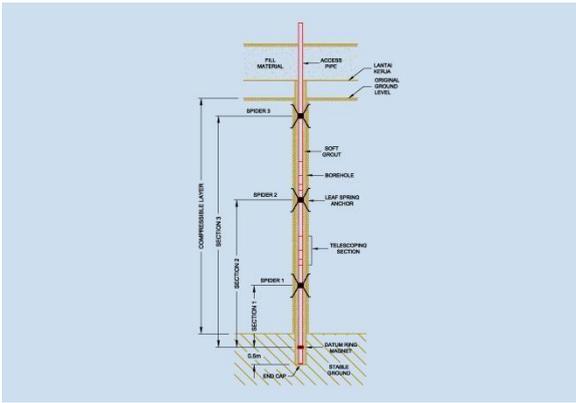


Gambar 30. Pemasangan *settlement plate*

Yang dimaksud dengan material *extensometer* adalah seperti yang ditunjukkan **Gambar 31**. *Extensometer* berfungsi untuk mengetahui kompresi lapisan tanah lempung lunak, dimana pemasangannya seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 32**.



Gambar 31. Material *extensometer*



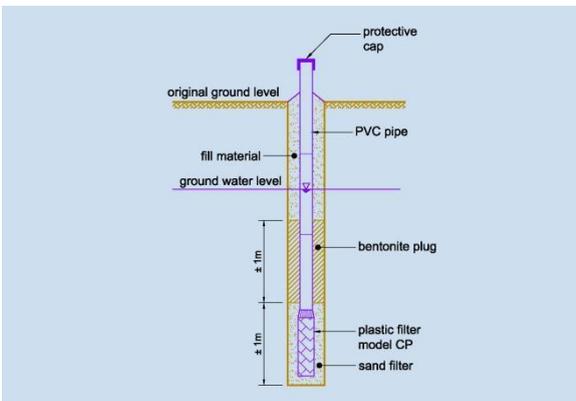
Gambar 32. Pemasangan *extensometer*

Pemasangan *piezometer* berfungsi untuk mengetahui perubahan tekanan air pori. Ada 3 (tiga) macam *piezometer* yang biasa digunakan pada pekerjaan perbaikan tanah lempung lunak metoda *preloading* dengan penggunaan PVD, yaitu *open standpipe piezometer*, *vibrating wire piezometer* dan *pneumatic piezometer*.

Yang dimaksud dengan material *open standpipe piezometer* adalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 33. Sedangkan pemasangan *open standpipe piezometer* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 34.



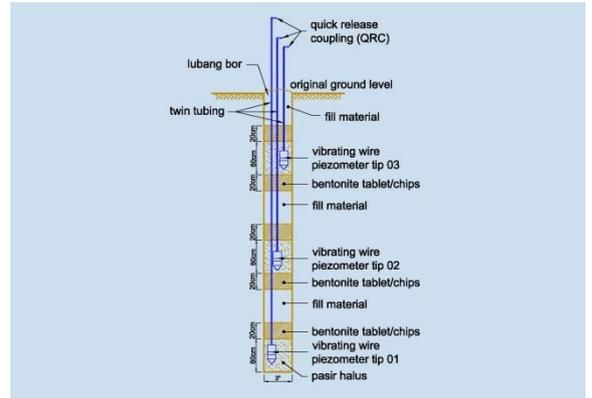
Gambar 33. Material *open standpipe pm*.



Gambar 34. Pemasangan *open standpipe pm*.



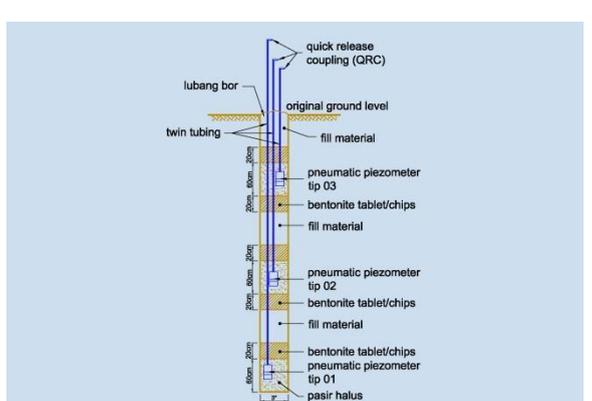
Gambar 35. Material *vibrating wire pm*.



Gambar 36. Pemasangan *vibrating wire pm*.



Gambar 37. Material *pneumatic piezometer*

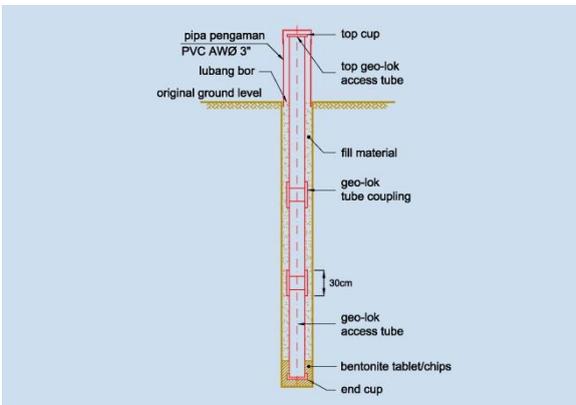


Gambar 38. Pemasangan *pneumatic piezometer*

Yang dimaksud dengan material *vibrating wire piezometer* adalah seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 35**. Sedangkan pemasangan *vibrating wire piezometer* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 36**. Yang dimaksud dengan material *pneumatic piezometer* adalah seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 37**. Sedangkan pemasangan *pneumatic piezometer* seperti ditunjukkan **Gambar 38**. Yang dimaksud dengan material *inclinometer* adalah seperti yang ditunjukkan **Gambar 39**. Pemasangan *inclinometer* berfungsi untuk mengetahui deformasi lateral tanah seperti pada **Gambar 40**.



Gambar 39. Material *inclinometer*

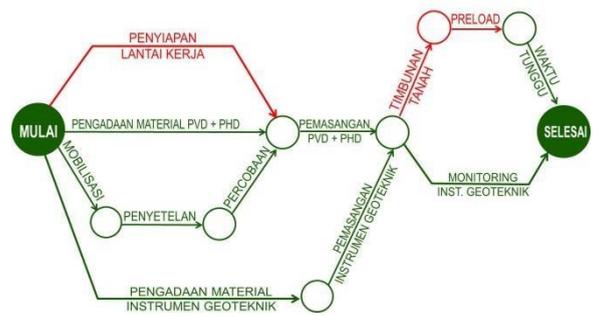


Gambar 40. Pemasangan *inclinometer*

6. PELAKSANAAN PEKERJAAN

6.1. Rencana Jaringan Kerja

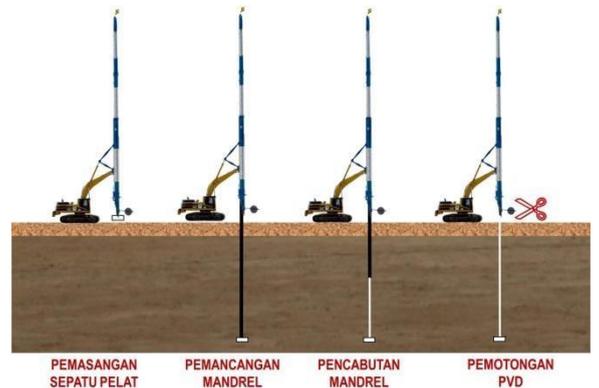
Rencana jaringan kerja (*network planning*) pelaksanaan pekerjaan perbaikan tanah lempung lunak metoda *preloading* dengan PVD ditunjukkan pada **Gambar 41**. Pada metoda *preloading* dengan PVD, waktu tunggu konsolidasi dihitung setelah ketinggian timbunan *preload* mencapai puncaknya. Kemudian setelah derajat konsolidasi yang direncanakan telah tercapai, dilakukan pembongkaran timbunan *preload*.



Gambar 41. Metoda *preloading* dengan PVD

6.2. Pemasangan PVD

Metoda pemasangan PVD ditunjukkan pada **Gambar 42**. Material PVD yang lentur dapat dimasukkan ke dalam tanah dengan menggunakan selongsong besi (*mandrel*) yang dipancang ke dalam tanah dengan menggunakan alat berat. Agar PVD dapat tertinggal di dalam tanah digunakan sepatu pelat (*anchor plate*) yang dipasang pada ujung bawah material PVD.



Gambar 42. Metoda pemasangan PVD

Pemasangan PVD dimulai dengan membuat pola pemasangan PVD di lapangan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 43**. Selanjutnya dilakukan pemasangan sepatu pelat seperti pada **Gambar 44**.



Gambar 43. Pola pemasangan PVD di lapangan



Gambar 44. Pemasangan sepatu pelat

Kemudian *mandrel* dipancarkan ke dalam tanah seperti pada **Gambar 45**. Setelah mencapai kedalaman yang direncanakan, *mandrel* ditarik ke atas dan dilakukan pemotongan PVD di atas permukaan tanah seperti pada **Gambar 46**.



Gambar 45. Pemancangan *mandrel* ke tanah



Gambar 46. Pemotongan PVD di atas tanah

6.3. Pemasangan PHD

Metoda pemasangan PHD ditunjukkan pada **Gambar 47**, **Gambar 48** dan **Gambar 49**. Pada **Gambar 47** ditunjukkan pemasangan PHD pada setiap 1 ujung PVD. Pada **Gambar 48** ditunjukkan pemasangan PHD pada setiap 2 ujung PVD yang dipasang dengan pola segitiga (*triangular pattern*). Pada **Gambar 49** ditunjukkan pema-

sangan PHD pada setiap 2 ujung PVD yang dipasang dengan pola bujur sangkar (*square pattern*).



Gambar 47. Pemasangan PHD pada 1 PVD



Gambar 48. Pemasangan PHD pada 2 PVD



Gambar 49. Pemasangan PHD pada 2 PVD

6.4. Pemasangan Instrumen Geoteknik

Pada **Gambar 50** sampai dengan **Gambar 55** ditunjukkan metoda pemasangan instrumen geoteknik, yang terdiri dari dari *settlement plate*, *extensometer*, *piezometer* dan *inclinometer*. Ada 3 (tipe) piezometer yang ditunjukkan pemasangannya, yaitu *open standpipe piezometer*, *vibrating wire piezometer* dan *pneumatic piezometer*.



Gambar 50. Pemasangan *settlement plate*



Gambar 54. Pemasangan *pneumatic piezometer*



Gambar 51. Pemasangan *extensometer*



Gambar 55. Pemasangan *inclinometer*



Gambar 52. Pemasangan *open standpipe pm.*



Gambar 53. Pemasangan *vibrating wire pm.*

7. MONITORING PEKERJAAN

Setelah instrumen geoteknik selesai dipasang, selanjutnya dilakukan penimbunan *preload* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 56**.



Gambar 56. Timbunan tanah *preload*

Selama proses penimbunan *preload* berlangsung dilakukan monitoring, sebagai berikut :

- tinggi timbunan
- penurunan tanah
- kompresi tanah
- tekanan air pori tanah
- pergerakan lateral tanah

7.1. Monitoring Tinggi Timbunan

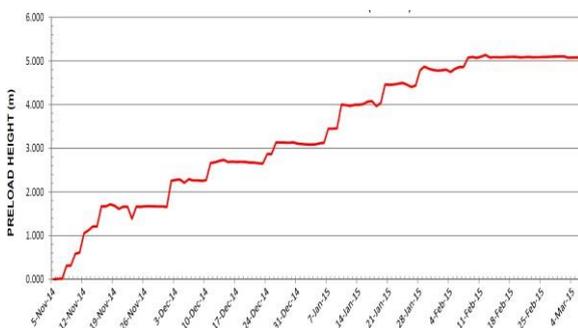
Untuk monitoring tinggi timbunan dilakukan pembacaan terhadap *settlement plate* dengan menggunakan alat baca *auto level* seperti ditunjukkan pada **Gambar 57**. Dari pembacaan yang ditunjukkan pada **Gambar 58** selanjutnya dibuat grafik monitoring tinggi timbunan seperti ditunjukkan pada **Gambar 59**.



Gambar 57. Alat baca *settlement plate*



Gambar 58. Monitoring *settlement plate*

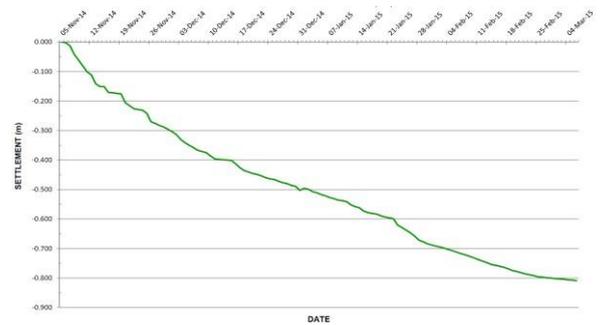


Gambar 59. Grafik monitoring tinggi timbunan

7.2. Monitoring Penurunan Tanah

Untuk monitoring penurunan tanah dilakukan pembacaan terhadap *settlement plate* dengan menggunakan alat baca *auto level* seperti ditun-

jukkan pada **Gambar 57**. Dari pembacaan yang ditunjukkan pada **Gambar 58** selanjutnya dibuat grafik monitoring penurunan tanah seperti ditunjukkan pada **Gambar 60**.



Gambar 60. Grafik monitoring penurunan tanah

7.3. Monitoring Kompresi Tanah

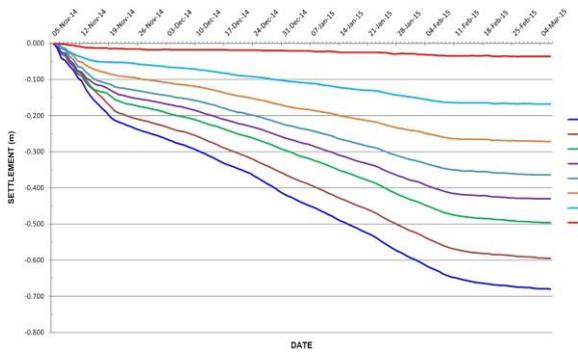
Untuk monitoring kompresi tanah dilakukan pembacaan terhadap *extensometer* dengan menggunakan alat baca *settlement probe* seperti ditunjukkan pada **Gambar 61**. Dari pembacaan yang ditunjukkan pada **Gambar 62** selanjutnya dibuat grafik monitoring kompresi tanah seperti ditunjukkan pada **Gambar 63**.



Gambar 61. Alat baca *extensometer*



Gambar 62. Monitoring *extensometer*



Gambar 63. Grafik monitoring kompresi tanah

7.4. Monitoring Tekanan Air Pori Tanah
 Untuk monitoring tekanan air pori tanah dilakukan pembacaan terhadap *piezometer*. Bila menggunakan *open standpipe piezometer* digunakan alat baca *water level indicator* seperti ditunjukkan pada **Gambar 64**. Bila menggunakan *vibrating wire piezometer* digunakan alat baca *data logger* seperti ditunjukkan pada **Gambar 65**. Bila menggunakan *pneumatic piezometer* digunakan alat baca *pneumatic pressure indicator* seperti ditunjukkan pada **Gambar 66**.



Gambar 64. Alat baca *open standpipe pm*.



Gambar 66. Alat baca *pneumatic piezometer*

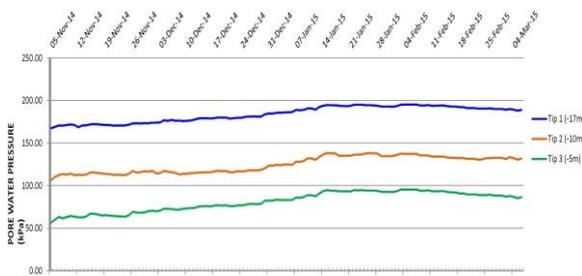
Dari pembacaan *open standpipe piezometer* pada **Gambar 67** selanjutnya dibuat grafik monitoring tekanan air pori tanah seperti pada **Gambar 70**. Dari pembacaan *vibrating wire piezometer* pada **Gambar 68** selanjutnya dibuat grafik monitoring tekanan air pori tanah seperti pada **Gambar 70**. Dari pembacaan *pneumatic piezometer* pada **Gambar 69** selanjutnya dibuat grafik monitoring tekanan air pori tanah seperti pada **Gambar 70**.



Gambar 67. Monitoring *open standpipe pm*.



Gambar 69. Monitoring *pneumatic piezometer*



Gambar 70. Grafik monitoring tekanan air pori

7.5. Monitoring Pergerakan Lateral Tanah

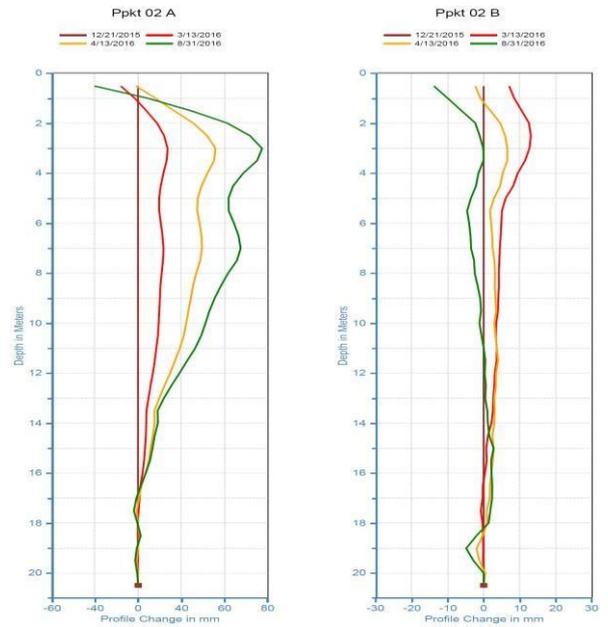


Gambar 71. Alat baca *inclinometer*



Gambar 72. Monitoring *inclinometer*

Untuk monitoring pergerakan lateral tanah dilakukan pembacaan terhadap *inclinometer* dengan menggunakan alat baca *digital inclinometer system* seperti ditunjukkan pada **Gambar 71**. Dari pembacaan yang ditunjukkan pada **Gambar 72** selanjutnya dibuat grafik monitoring pergerakan lateral tanah seperti ditunjukkan pada **Gambar 73**.



Gambar 73. Grafik pergerakan lateral tanah

8. EVALUASI KINERJA PEKERJAAN

Monitoring pekerjaan perbaikan tanah metoda *preloading* dengan penggunaan PVD dilakukan selama proses penimbunan dilaksanakan sampai dengan tercapainya penurunan tanah dan/atau derajat konsolidasi yang direncanakan. Apabila penurunan tanah dan/atau derajat konsolidasi yang direncanakan tersebut telah tercapai, selanjutnya dilakukan pekerjaan pembongkaran timbunan *preload (unloading)* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 74**.

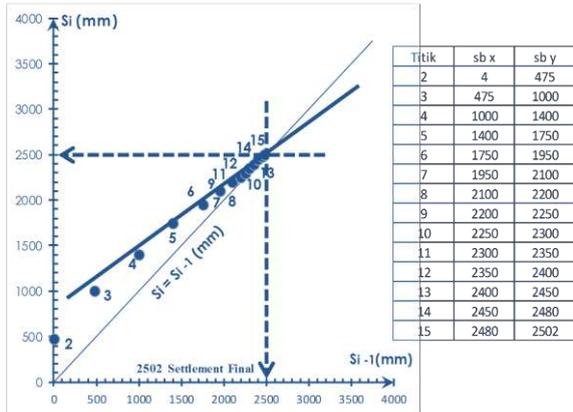


Gambar 74. Pembongkaran timbunan *preload*

8.1. Evaluasi Penurunan Tanah

Untuk mengetahui kinerja penurunan tanah dilakukan evaluasi terhadap grafik monitoring penurunan tanah dengan menggunakan metoda **ASAOKA** seperti ditunjukkan pada **Gambar 75** untuk mengetahui :

- penurunan total yang akan terjadi
- waktu untuk mencapai penurunan total



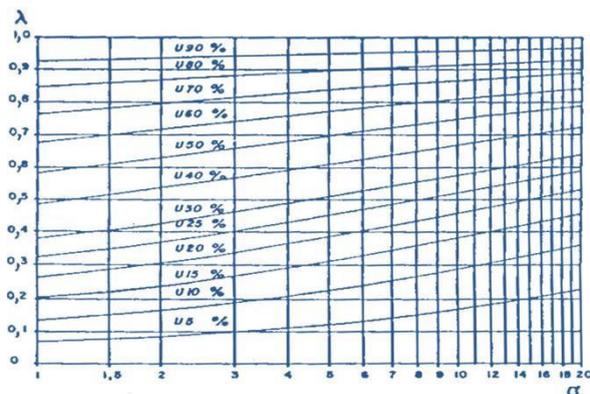
Gambar 75. Metoda Asaoka

Dengan metoda **ASAOKA** tersebut selanjutnya dapat dibuat tabel evaluasi penurunan tanah seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Evaluasi penurunan tanah

No.	Subject	Kumulatif Settlement Lapangan (mm)	Prediksi Settlement Final (mm) (ASAOKA)	Prediksi Waktu total Settlement dari Start (hari)	Prediksi sisa hari terhadap 11 Juni 2012	Tanggal akhir settlement th. 2012
1	SP 01	3176	3180	136	4	15 Juni
2	SP 02	1218	1220	150	18	29 Juni
3	SP 03	1077	1090	144	12	23 Juni
4	SP 04	1140	1150	140	8	19 Juni
5	SP 05	2510	2560	140	8	19 Juni
6	SP 06	1701	1750	150	18	29 Juni
7	SP 07	1350	1350	140	8	19 Juni
8	SP 08	1372	1400	150	18	29 Juni
9	SP 09	1855	1860	136	4	15 Juni
10	SP 10	1906	1910	140	8	19 Juni

8.2. Evaluasi Konsolidasi Tanah



Gambar 76. Grafik Peignaud

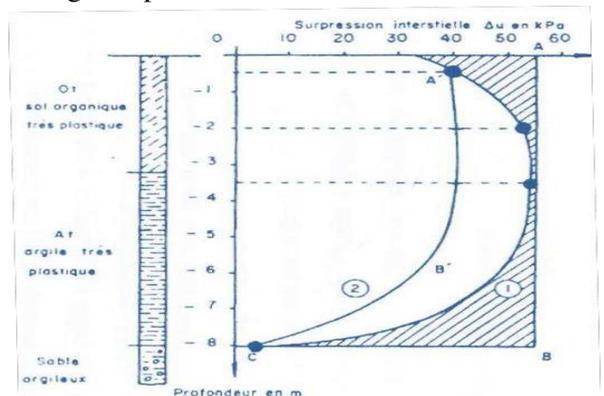
Untuk mengetahui kinerja konsolidasi tanah dapat dilakukan evaluasi terhadap grafik monitoring penurunan tanah dengan menggunakan grafik **PEIGNAUD** pada **Gambar 76**.

Dengan metoda grafik **PEIGNAUD** tersebut selanjutnya dapat dibuat tabel evaluasi konsolidasi tanah seperti ditunjukkan pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Evaluasi konsolidasi tanah

Titik	Sct (cm)	Szc (cm)	λ	Δσ (ton/m ²)	σ _{vo} ' (ton/m ²)	α	U (%)
SP 1	250.2	161.28	1.55	8.1	8.85	0.92	96.60
SP 2	237	161.28	1.47	8.1	8.85	0.92	96.30
SP 3	240	161.28	1.49	8.1	8.85	0.92	96.40
SP 4	187	161.28	1.16	8.1	8.85	0.92	94.40
SP 5	205	161.28	1.27	8.1	8.85	0.92	93.00
SP 6	213	219.97	0.97	9	8.82	1.02	94.00
SP 7	222.5	219.97	1.01	9	8.82	1.02	94.20
SP 8	229	205.92	1.11	8.1	8.82	0.92	94.30
SP 9	206.5	137.76	1.50	6.3	8.85	0.71	96.45
SP 10	206	137.76	1.50	6.3	8.85	0.71	96.45
SP 11	209	137.76	1.52	6.3	8.85	0.71	96.47
SP 12	230.5	161.28	1.43	8.1	8.85	0.92	95.60
SP 13	164	137.76	1.19	6.3	8.85	0.71	94.60
SP 14	186	190.98	0.97	7.20	8.82	0.82	94.00
SP 15	170	175.01	0.97	6.30	8.82	0.71	94.00
SP 16	193	175.01	1.10	6.30	8.82	0.71	94.30
SP 17	204	137.76	1.48	6.3	8.85	0.71	96.35
SP 18	212	137.76	1.54	6.3	8.85	0.71	96.50
SP 19	212.5	149.91	1.42	7.2	8.85	0.81	95.50
SP 20	219.5	149.91	1.46	7.2	8.85	0.81	96.20
SP 21	175	137.76	1.27	6.3	8.85	0.71	93.50
SP 22	170	175.01	0.97	6.30	8.82	0.71	94.00
SP 23	167	175.01	0.95	6.30	8.82	0.71	94.00
SP 24	185	175.01	1.06	6.30	8.82	0.71	94.20
SP 25	185	137.76	1.34	6.3	8.85	0.71	94.60
SP 26	183	137.76	1.33	6.3	8.85	0.71	94.55
SP 27	155	137.76	1.13	6.3	8.85	0.71	94.35
SP 28	152	137.76	1.10	6.3	8.85	0.71	94.28
SP 29	162	137.76	1.18	6.3	8.85	0.71	94.38
SP 30	155	137.76	1.13	6.30	8.85	0.71	94.35
SP 31	142	137.76	1.03	6.30	8.85	0.71	94.25
SP 32	162	137.76	1.18	6.30	8.85	0.71	94.38

Untuk mengetahui kinerja konsolidasi tanah dapat juga dilakukan evaluasi terhadap grafik monitoring tekanan air pori dengan menggunakan grafik pada **Gambar 77**.



Gambar 77. Grafik evaluasi konsolidasi tanah

9. APLIKASI DI PULAU KALIMANTAN

Perbaikan tanah lempung lunak metoda *pre-loading* dengan penggunaan PVD telah banyak diaplikasikan di Pulau Kalimantan. Lebih dari 150 (seratus lima puluh) kontrak pekerjaan yang telah dilaksanakan Penulis, sekurang-kurangnya ada 21 (dua puluh satu) kontrak pekerjaan yang telah dilaksanakan di Pulau Kalimantan.

Tabel 5. Aplikasi di Pulau Kalimantan

NO	NAMA PROYEK	LOKASI	TAHUN
1	Bendungan Manggar	Balikpapan	1999
2	Stadion Utama Palaran	Samarinda	2005
3	Pelabuhan Trisakti	Banjarmasin	2006
4	Stadion Madya Perjiwa	Tenggarong	2006
5	Pelabuhan Bagendang	Sampit	2008
6	Pelabuhan Trisakti	Banjarmasin	2008
7	Pelabuhan Palaran	Samarinda	2008
8	Bandara Samarinda Baru	Samarinda	2008
9	Depo Meratus	Banjarmasin	2010
10	Pelabuhan Bagendang	Sampit	2010
11	Bandara Juwata	Tarakan	2010
12	Pelabuhan Trisakti	Banjarmasin	2012
13	Pelabuhan Kariangau	Balikpapan	2012
14	Pabrik Kantong Semen Indonesia	Balikpapan	2013
15	Pabrik Pupuk PT. PKT	Bontang	2013
16	Perumahan Citraland City	Samarinda	2013
17	Bandara Samarinda Baru	Samarinda	2013
18	Jalan Balikpapan - Samarinda	Samarinda	2014
19	Bendungan Teritip	Balikpapan	2015
20	Pabrik Pupuk PT. PKT	Bontang	2015
21	Jalan Trisakti - Lianggang	Banjarmasin	2016

Berikut ini diuraikan sebagian dari perbaikan tanah metoda *preloading* dengan penggunaan PVD yang diaplikasikan pada pembangunan infrastruktur transportasi di Pulau Kalimantan.

9.1. Infrastruktur Transportasi Air

Perbaikan tanah metoda *preloading* dengan penggunaan PVD telah diaplikasikan pada Proyek Pembangunan Pelabuhan Bagendang di Sampit, Kalimantan Tengah, pada tahun 2010.



Gambar 78. Pemasangan PVD

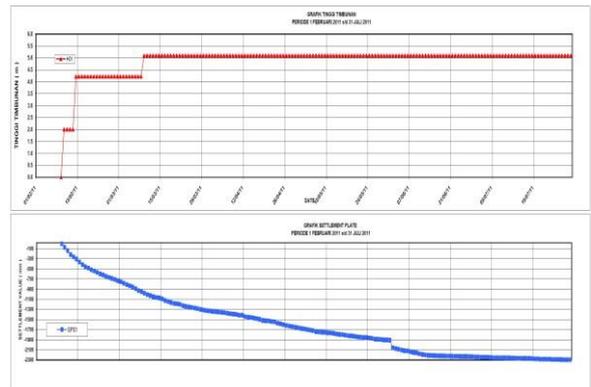


Gambar 79. Pemasangan PHD



Gambar 80. Monitoring instrumen geoteknik

Pekerjaan pemasangan PVD ditunjukkan pada **Gambar 78**. Pekerjaan pemasangan PHD ditunjukkan pada **Gambar 79**. Pelaksanaan monitoring instrumen geoteknik ditunjukkan pada **Gambar 80**. Kinerja penurunan tanah lempung lunak yang berhasil dilakukan ditunjukkan pada **Gambar 81**.



Gambar 81. Kinerja penurunan tanah

Perbaikan tanah metoda *preloading* dengan penggunaan PVD juga telah diaplikasikan pada Proyek Pembangunan Pelabuhan Trisakti di Banjarmasin, Kalimantan Selatan, pada tahun 2012.



Gambar 82. Pemasangan PVD



Gambar 83. Pemasangan PHD



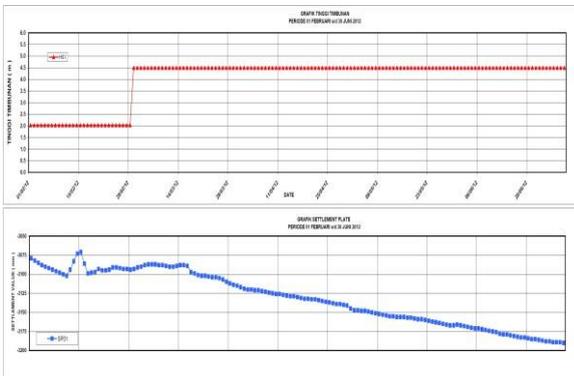
Gambar 86. Pemasangan geotextile



Gambar 84. Monitoring instrumen geoteknik



Gambar 87. Pemasangan PVD



Gambar 85. Kinerja penurunan tanah

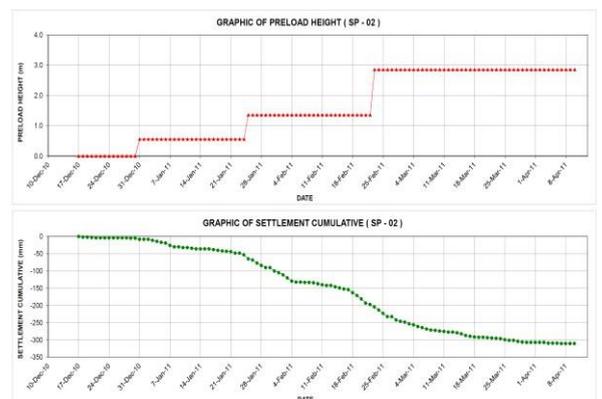


Gambar 88. Pemasangan instrumen geoteknik

Pelaksanaan pemasangan PVD ditunjukkan pada **Gambar 82**. Pelaksanaan pemasangan PHD ditunjukkan pada **Gambar 83**. Pelaksanaan monitoring instrumen geoteknik ditunjukkan pada **Gambar 84**. Kinerja penurunan tanah lempung lunak yang berhasil dilakukan ditunjukkan pada **Gambar 85**.

9.2. Infrastruktur Transportasi Udara

Perbaikan tanah metoda *preloading* dengan penggunaan PVD telah diaplikasikan pada Proyek Pembangunan Bandar Udara Juwata di Tarakan, Kalimantan Utara, pada tahun 2010.



Gambar 89. Kinerja penurunan tanah

Pelaksanaan pemasangan *geotextile* ditunjukkan pada **Gambar 86**. Pelaksanaan pemasangan PVD ditunjukkan pada **Gambar 87**. Pelaksanaan pemasangan instrumen geoteknik ditunjukkan pada **Gambar 88**. Kinerja penurunan tanah lempung lunak yang berhasil dilakukan ditunjukkan pada **Gambar 89**.

Perbaikan tanah metoda *preloading* dengan penggunaan PVD juga telah diaplikasikan pada Proyek Pembangunan Bandar Udara Samarinda Baru di Samarinda, Kalimantan Timur, pada tahun 2013.



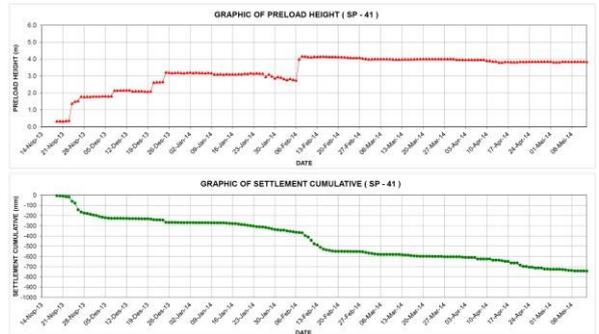
Gambar 90. Pemasangan *geotextile*



Gambar 91. Pemasangan PVD



Gambar 92. Monitoring instrumen geoteknik



Gambar 93. Kinerja penurunan tanah

Pelaksanaan pemasangan *geotextile* ditunjukkan pada **Gambar 90**. Pelaksanaan pemasangan PVD ditunjukkan pada **Gambar 91**. Pelaksanaan monitoring instrumen geoteknik ditunjukkan pada **Gambar 92**. Kinerja penurunan tanah lempung lunak yang berhasil dilakukan ditunjukkan pada **Gambar 93**.

9.3. Infrastruktur Transportasi Darat

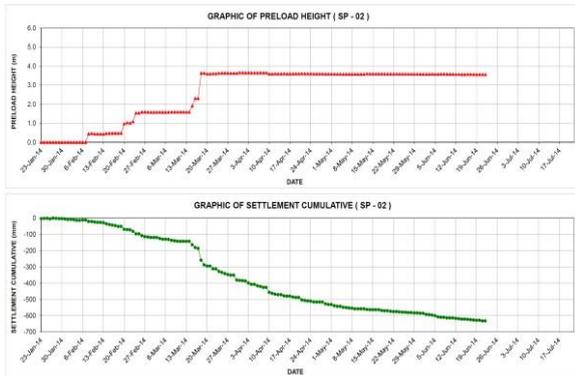
Perbaikan tanah metoda *preloading* dengan penggunaan PVD telah diaplikasikan pada Proyek Pembangunan Jalan Bebas Hambatan Balikpapan – Samarinda Paket 4 di Samarinda, Kalimantan Timur, pada tahun 2014.



Gambar 94. Pemasangan *geotextile*



Gambar 95. Monitoring instrumen geoteknik



Gambar 96. Kinerja penurunan tanah

Pelaksanaan pemasangan *geotextile* ditunjukkan pada Gambar 94. Pelaksanaan monitoring instrumen geoteknik ditunjukkan pada Gambar 95. Kinerja penurunan tanah lempung lunak yang berhasil dilakukan ditunjukkan Gambar 96.

Perbaikan tanah metoda *preloading* dengan penggunaan PVD juga telah diaplikasikan pada Proyek Pembangunan Jalan Trisakti – Liang Anggang di Banjarmasin, Kalimantan Selatan, pada tahun 2016. Pada saat makalah ini ditulis, Proyek Pembangunan Jalan Trisakti – Liang Anggang ini masih dalam proses pelaksanaan.



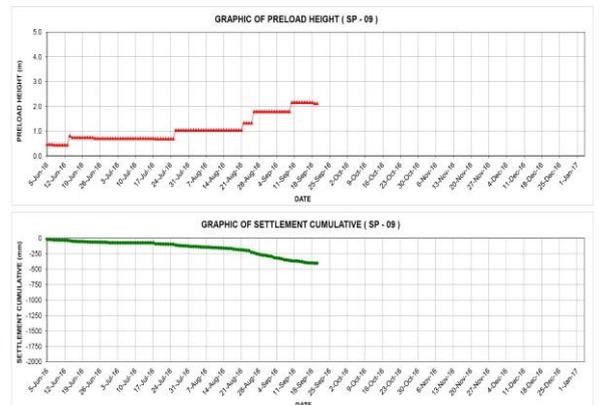
Gambar 97. Pemasangan PVD



Gambar 98. Pemasangan PHD



Gambar 99. Monitoring instrumen geoteknik



Gambar 100. Kinerja penurunan tanah

Pelaksanaan pemasangan PVD ditunjukkan pada Gambar 97. Pelaksanaan pemasangan PHD ditunjukkan pada Gambar 98. Pelaksanaan monitoring instrumen geoteknik ditunjukkan pada Gambar 99. Kinerja penurunan tanah lempung lunak yang berhasil dilakukan ditunjukkan pada Gambar 100.

9.4. Penerapan Kontrak Berbasis Kinerja

Pekerjaan perbaikan tanah lempung lunak metoda *preloading* dengan penggunaan PVD telah diaplikasikan dengan menerapkan sistem kontrak berbasis kinerja (*performance based contract*) pada Proyek Pembangunan Stasiun Curah Bagendang di Sampit, Kalimantan Tengah, pada tahun 2008.

Kriteria penerimaan kinerja pekerjaan yang disyaratkan adalah :

- Besarnya kecepatan penurunan pada 90% konsolidasi tercapai < 0,012 mm per hari.
- Derajat konsolidasi rata-rata pada lapisan tanah yang berkonsolidasi tercapai > 90%.
- Shear strength* tanah dasar meningkat dengan capaian > 20%.

10. PENUTUP

Penulis telah belajar dari berbagai nara sumber mengenai pekerjaan perbaikan tanah lempung lunak metoda *preloading* dengan penggunaan PVD selama 25 (dua puluh lima) tahun, sejak tahun 1991. Selama kurun waktu tersebut, Penulis juga telah memperoleh kepercayaan untuk melaksanakan lebih dari 150 (seratus lima puluh) kontrak pekerjaan perbaikan tanah lempung lunak metoda *preloading* dengan penggunaan PVD di wilayah Pulau Sumatera, Pulau Jawa dan Pulau Kalimantan.

Oleh sebab itu Penulis mengucapkan terima kasih yang tidak terhingga kepada para nara sumber, terutama para akademisi, yaitu kepada :

- a. Prof. Ir. Indrasurya B. Mochtar, MSc, PhD, Guru Besar Geoteknik ITS, yang telah mengajarkan teori teknik perbaikan tanah (*soil improvement*) secara umum.
- b. Prof. Ir. Noor Endah Mochtar, MSc, PhD, Guru Besar Geoteknik ITS, yang telah mengajarkan teori teknik perbaikan tanah gambut (*peat soil*).
- c. Prof. Dr. Ir. Herman Wahyudi, DEA, Guru Besar Geoteknik ITS, yang telah memberikan kepercayaan untuk melaksanakan disain teknik yang ditanganinya.
- d. Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA, Guru Besar Geoteknik ITS, yang telah memberikan kepercayaan untuk melaksanakan disain teknik yang ditanganinya.
- e. Prof. Ir. Paulus P. Rahardjo, MSCE, PhD, Guru Besar Geoteknik UNPAR, yang telah memberikan kepercayaan untuk melaksanakan disain teknik yang ditanganinya.
- f. Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSE, PhD, Guru Besar Geoteknik ITB, yang telah memberikan kritik dan saran.
- g. Prof. Dr. Ir. Hary Christady Hardiyatmo, M.Eng, Guru Besar Geoteknik UGM, yang telah memberikan kritik dan saran.
- h. Prof. Dr. Ir. Sri Prabandiyani, MSc, Guru Besar Geoteknik UNDIP, yang telah memberikan kritik dan saran.
- i. Prof. Dr. Ir. H. Lawalenna Samang, MS, MEng, Guru Besar Geoteknik UNHAS, yang telah memberikan kritik dan saran.
- j. Prof. Ir. Widjojo A. Prakoso, MSc, PhD, Guru Besar Geoteknik UI, yang telah memberikan kritik dan saran.
- k. Prof. Dr. Ir. Munirwansyah, MSc, Guru Besar Geoteknik UNSYIAH, yang telah memberikan kritik dan saran.

Referensi

- [1]. Kuswanda, Wahyu P., Penerapan Sistem Kontrak Berbasis Kinerja pada Pekerjaan Perbaikan Tanah Lunak, *Proceedings Konferensi Regional Teknik Jalan Ke-10 (KRTJ-10)*, HPJI, Surabaya, 2008.
- [2]. Kuswanda, Wahyu P., Peranan Instrumentasi Geoteknik untuk Mendukung Kontrak Berbasis Kinerja Pembangunan Prasarana Transportasi di Indonesia, *Proceedings Seminar Nasional Teknik Jalan 2013*, HPJI, Medan, 2013.
- [3]. Kuswanda, Wahyu P., Pemantauan Instrumen Geoteknik sebagai Indikator Kinerja Tanah Dasar Lunak pada Kontrak Pembangunan Jalan Berbasis Kinerja, *Proceedings Konferensi Regional Teknik Jalan Ke-12 (KRTJ-12)*, HPJI, Bandung, 2013.
- [4]. Kuswanda, Wahyu P., Penerapan Kontrak Berbasis Kinerja Pembangunan Prasarana Transportasi pada Tanah Lempung Lunak, *Proceedings Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Prasarana Wilayah 2014 (ATPW-2014)*, Program Diploma Teknik Sipil, FTSP, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2014.
- [5]. Kuswanda, Wahyu P., Aplikasi Instrumen Geoteknik pada Pembangunan Prasarana Transportasi, *Proceedings Simposium Internasional ke-17 Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi*, Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi (FSTP) dan Universitas Jember, Jember, 2014.
- [6]. Kuswanda, Wahyu P., Penanganan Problema Pembangunan Infrastruktur Transportasi pada Tanah Lempung Lunak, *Proceedings Seminar Nasional Teknik Jalan 2014*, HPJI, Palangkaraya, 2014.
- [7]. Kuswanda, Wahyu P., Urgensi Monitoring Kinerja Tanah Lempung Lunak pada Pembangunan Prasarana Transportasi di Indonesia, *Proceedings Konferensi Regional Teknik Jalan Ke-13 (KRTJ-13)*, HPJI, Makasar, 2014.
- [8]. Kuswanda, Wahyu P., Rekayasa Geoteknik Tanah Lempung Lunak pada Pembangunan Infrastruktur Transportasi, *Proceedings Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Prasarana Wilayah 2015 (ATPW-2015)*, Program Diploma Teknik Sipil, FTSP, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2015.