

BEBERAPA TIPE PERKUATAN TANAH UNTUK MENGATASI *SLIDING* TIMBUNAN DI ATAS TANAH LUNAK

Helmy Darjanto¹, Djoko Soepriyono² dan Achmad Wicaksono, As'ad Munawir³

¹ Jurusan Teknik Sipil Universitas Narotama Surabaya, Sertifikasi G1, Sekretaris HATTI (Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia) Jawa Timur

Email: h.darjanto@consultant.com

² Jurusan Teknik Sipil Universitas Sunan Giri Surabaya, anggota HATTI (Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia), Sertifikasi G1, Ketua INKINDO Jawa Timur

Email: tamara@rad.net.id

³ Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya

Email: wicaksono68@yahoo.com

ABSTRAK

Mengacu kepada potensi garis pantai di Indonesia yakni sepanjang 80.000 km., maka pekerjaan reklamasi pantai sering dilakukan dalam pengembangan daerah pelabuhan. Dalam pekerjaan ini permasalahan kelongsoran khususnya pada reklamasi di atas tanah lempung lunak – sangat lunak sering terjadi. Hal yang sama juga terjadi (kelongsoran) pada ruas-ruas jalan di atas tanah. Untuk mengatasi kelongsoran di atas, yakni pekerjaan reklamasi di atas tanah lempung lunak – sangat lunak, penyedia jasa sering menggunakan teknologi PVD (*Prefabricated Vertical Drain*). Teknologi ini mempercepat proses konsolidasi dan meningkatkan kuat dukung tanah sehingga permasalahan kelongsoran dapat dicegah. Kelemahan teknologi ini, pada kenyataannya penurunan global masih sering terjadi, seperti kasus di pelabuhan sisi utara pulau Jawa (daerah kipas/sedimen kuarter); ruas-ruas jalan di Jawa sisi utara: Lamongan; perumahan mewah Laguna Surabaya dan lain-lain. Selain itu di beberapa negara maju menggunakan teknologi perkuatan tanah: *geo mattress*. Teknologi ini mampu meneruskan garis kelongsoran ke tanah yang lebih baik, akan tetapi kelemahan teknologi ini tidak memiliki kekakuan yang baik sehingga penurunan diferensial pada tanah timbunan sering terjadi. Dengan prinsip yang mirip dengan *geo mattress*, banyak enjiner kita menggunakan teknologi matras bambu. Teknologi ini memiliki kekakuan matras yang lebih baik, hal ini dibuktikan oleh Masyhur Irsyam (2005) pada penelitiannya tentang tanah timbunan (*full scale test*) di Tambak Oso. Penurunan yang terjadi di beberapa titik amatan timbunan yang tersebar adalah mirip / relatif sama. Kelemahan teknologi matras bambu adalah durabilitas material bambu. Hal ini dikarenakan konservasi bambu di Indonesia belum dilaksanakan. Oleh karena permasalahan di atas, perlu diteliti suatu teknologi yang mampu mengatasi kelemahan-kelemahannya maka teknologi yang diharapkan dapat dilakukan penelitian terintegrasi adalah teknologi “Angker Ketela dan Matras Lebah”

Kata kunci: perkuatan tanah, matras lebah, bambu, *geo mattress*, tanah lunak, *sliding*

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan, yang 80.000 kilometer merupakan garis pantai. Kondisi ini sangat strategis untuk pengembangan daerah pelabuhan yang bisa memberikan kontribusi pendapatan daerah / regional / nasional kemudian ruas-ruas jalan yang berbilang jutaan kilometer menjadi tanggung jawab pemerintah dalam peningkatan dan perawatan.

Mengacu kepada potensi garis pantai di Indonesia di atas, pekerjaan yang sering dilakukan dalam pengembangan daerah pelabuhan adalah reklamasi pantai. Dalam pekerjaan ini permasalahan kelongsoran khususnya pada reklamasi di atas tanah lempung lunak – sangat lunak sering terjadi. Hal yang sama juga terjadi (kelongsoran) pada ruas-ruas jalan di atas tanah labil.

PVD (*Prefabricated Vertical Drain*). Untuk mengatasi kelongsoran di atas, yakni pekerjaan reklamasi di atas tanah lempung lunak – sangat lunak, penyedia jasa sering menggunakan teknologi PVD (*Prefabricated Vertical Drain*). Teknologi ini mempercepat proses konsolidasi dan meningkatkan kuat dukung tanah sehingga permasalahan kelongsoran dapat dicegah. Kelemahan teknologi ini, pada kenyataannya penurunan global masih sering terjadi, seperti kasus di Pelabuhan Tanjung Mas, Semarang; ruas-ruas jalan di Jawa sisi utara: Lamongan; perumahan mewah pantai kapuk Jakarta, Laguna Surabaya.

Geo Mattress. Selain teknologi di atas di beberapa negara maju menggunakan teknologi perkuatan tanah: *geo mattress*. *Geo mattress* dibentuk oleh *triangular cells* yang bahannya terbuat dari geotextile jenis geogrid. Teknologi ini mampu meneruskan garis kelongsoran ke tanah yang lebih baik kuat gesernya, akan tetapi kelemahan teknologi ini tidak memiliki kekakuan yang baik sehingga penurunan diferensial pada tanah timbunan sering terjadi.

Kelongsoran pada:



Ruas Jalan



Reklamasi Pantai

Gambar 1. Kelongsoran pada ruas jalan & reklamasi pantai

Teknologi PVD:



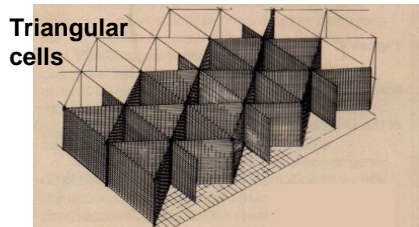
Tanjung Mas, Semarang



Perumahan Laguna, Surabaya

Gambar 2. Pemakaian teknologi PVD

Teknologi *Geo Mattress*:



Triangular Cells (Geogrid)

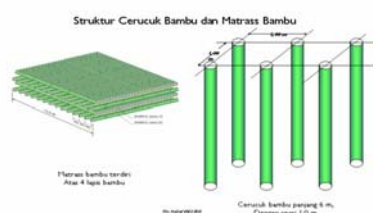


Pelaksanaan Di atas Tanah Lunak

Gambar 3. Pemakaian teknologi *geo mattress*

Matras Bambu. Dengan prinsip yang mirip dengan *geo mattress*, banyak enjiner kita menggunakan teknologi matras bambu. Teknologi ini memiliki kekakuan matras yang lebih baik, hal ini dibuktikan oleh Masyhur Irsyam (2005) pada penelitiannya tentang tanah timbunan (*full scale test*) di Tambak Oso. Penurunan yang terjadi di beberapa titik amatan timbunan yang tersebar adalah mirip / relatif sama. Kelemahan teknologi matras bambu adalah durabilitas material bambu. Hal ini dikarenakan konservasi bambu di Indonesia belum dilaksanakan.

Teknologi Matras Bambu:



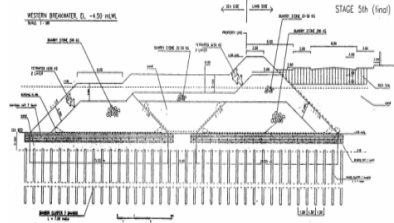
Cerucuk dan Matras Bambu



Uji Skala Penuh Untuk Timbunan Jalan

Gambar 5. Aplikasi struktur cerucuk dan matras bambu

Penggunaan matras dan cerucuk bambu di atas tanah lunak sudah banyak dilakukan pada beberapa pekerjaan, antara lain : di Pantai Mutiara – Jakarta, Tambak Lorok – Semarang, *Boezem* Morokrembangan – Surabaya, dan *Trial Embankment* Skala Penuh di Surabaya *Eastern Ring Road* (SERR), lihat Gambar 6.



Pantai Mutiara, Jakarta



Tambak Lorok, Semarang – 1995



Boezem Morokrembangan, Surabaya – 1999

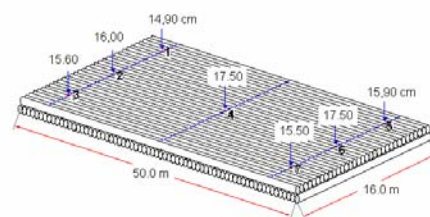


Trial Embankment SERR, Surabaya – 2005

Gambar 6. Aplikasi matras bambu pada beberapa proyek

Pada uji skala penuh timbunan di Surabaya *Eastern Ring Road* (SERR) penurunan yang terjadi pada tiap-tiap posisi amatan dari *settlement plate* menunjukkan bahwasanya matras bambu memiliki kekakuan yang lebih baik dibanding penggunaan *geotextile* / *geo mattress*. (Lihat Gambar 7)

TOTAL PENURUNANKONSOLIDASI PADA TIAP-TIAP POSISI SETTLEMENT PLATE



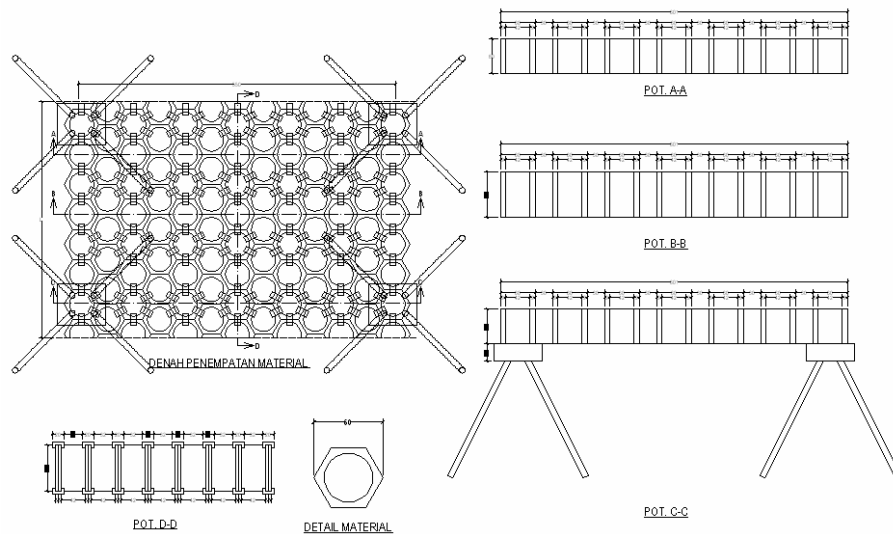
Gambar 7. Kekakuan matras bambu mampu menyebarkan penurunan

2. ANGKER KETELA DAN MATRAS LEBAH

Struktur ini diharapkan mampu mengisi kekurangan teknologi yang telah diterangkan di atas karena selain memiliki kekakuan yang baik juga durabilitas bahan bisa dipertanggungjawabkan. Oleh karenanya perlu dilakukan riset untuk menguji mekanisme struktur Angker Ketela dan Matras Lebah.

Struktur di atas terdiri dari angker dan matras lebah. Angker ketela berfungsi sebagai penahan cabut / tarik sedangkan matras lebah berfungsi sebagai perkuatan tanah. Bahan angker terbuat dari beton bertulang sedangkan matras lebah bisa terbuat dari polimer atau beton bertulang / komposit lainnya bergantung kondisi tanah di atas timbunan yang akan dibangun.

Prototipe struktur Angker Ketela dan Matras Lebah dapat dilihat pada Gambar 8 di bawah ini.



Gambar 8. Prototipe angker ketela dan matras lebah

3. PENELITIAN

Penelitian masih dalam proses penyelesaian terhadap pemodelan numerik dan membuat uji skala laboratorium untuk observasi penurunan yang terjadi terhadap pembebanan yang diberikan pada struktur Angker Ketela dan Matras Lebah.

Analisa Numerik. Teori penyelesaian matematis dan analisa menggunakan pendekatan metode elemen hingga. Perilaku mekanis dari tanah pada dasarnya dapat dimodelkan pada berbagai tingkat akurasi. Plastisitas dihubungkan dengan terbentuknya regangan yang berdeformasi tetap. Untuk mengevaluasi apakah telah terjadi plastisitas terjadi dalam perhitungan, sebuah fungsi leleh (yield function), f , dinyatakan sebagai fungsi dari tegangan dan regangan. Sebuah fungsi leleh umumnya dapat dinyatakan sebagai suatu bidang dalam ruang tegangan utama. Sesuai dengan metode elemen hingga, sebuah kontinum dibagi menjadi sejumlah elemen (volumetrik). Setiap elemen memiliki sejumlah titik nodal. Setiap titik nodal mempunyai sejumlah derajat kebebasan yang berkaitan dengan nilai diskret dari variabel yang tidak diketahui dalam permasalahan nilai batas yang akan diselesaikan. Dalam kasus deformasi ini, derajat kebebasan berkaitan dengan komponen perpindahan.

Perpindahan diskret dapat diformulasikan sebagai berikut :

$$\int \underline{\underline{B}}^T \cdot \Delta \underline{\underline{\sigma}} \cdot dV = \int \underline{\underline{N}}^T \cdot \underline{\underline{p}}^i \cdot dV + \oint \underline{\underline{N}}^T \cdot \underline{\underline{t}}^i \cdot dS - \int \underline{\underline{B}}^T \cdot \underline{\underline{\sigma}}^{i-1} \cdot dV \quad (1)$$

dimana :

- $\underline{\underline{B}}^T$: transpose *matrix* interpolasi regangan
- $\Delta \underline{\underline{\sigma}}$: penambahan vektor dari komponen tegangan
- $\underline{\underline{N}}^T$: transpose *matrix* dari fungsi bentuk

- \underline{p}^i : vektor gaya saat kondisi aktual i
 \underline{t}^i : traksi pada batas saat kondisi aktual i
 $\underline{\sigma}^{i-1}$: vektor dari komponen tegangan sebelumnya

Peningkatan tegangan, $\Delta \underline{\sigma}$, diperoleh dengan mengintegrasikan perubahan tegangan terhadap waktu. Untuk model plastisitas diferensial, peningkatan tegangan dapat secara umum dituliskan sebagai berikut :

$$\Delta \underline{\sigma} = \underline{D}^e \cdot (\Delta \underline{\varepsilon} - \Delta \underline{\varepsilon}^p) \quad (2)$$

Dalam hubungan ini \underline{D}^e menyatakan matrix kekakuan elastik dari material untuk peningkatan tegangan saat ini. Peningkatan regangan $\Delta \underline{\varepsilon}$ diperoleh dari peningkatan perpindahan $\Delta \underline{v}$ dengan menggunakan matrix interpolasi regangan \underline{B} ($\Delta \underline{\varepsilon} = \underline{B} \cdot \Delta \underline{v}$).

Untuk perilaku material yang elastik, peningkatan regangan plastis $\Delta \underline{\varepsilon}^p$ adalah nol. Sedangkan untuk perilaku material yang plastis, peningkatan regangan palstis dapat ditulis, menurut Vermeer (1979), sebagai berikut :

$$\Delta \underline{\varepsilon}^p = \Delta \lambda \left[(1 - \omega) \left(\frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}} \right)^{i-1} + \omega \left(\frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}} \right)^i \right] \quad (3)$$

Dalam persamaan (3), $\Delta \lambda$, adalah peningkatan dari faktor pengali plastis dan ω adalah sebuah parameter yang mengindikasikan jenis integrasi waktu.

Substitusi dari hubungan antara peningkatan tegangan dan regangan, $\Delta \underline{\sigma} = \underline{M} \cdot \Delta \underline{\varepsilon}$, dimana \underline{M} adalah matrix kekakuan material, ke dalam persamaan (1) akan menghasilkan persamaan :

$$\underline{K}^i \cdot \Delta \underline{v}^i = \underline{f}_{ex}^i - \underline{f}_{in}^{i-1} \quad (4)$$

Dari persamaan (4), \underline{K} , adalah matrix kekakuan, $\Delta \underline{v}$ adalah perubahan vektor perpindahan, \underline{f}_{ex} adalah vektor gaya external, dan \underline{f}_{in} adalah vektor gaya internal. Notasi i menyatakan nomor iterasi langkah. Namun karena hubungan antara peningkatan tegangan dan regangan umumnya adalah non-linier, maka matrix kekakuan tidak dapat diformulasikan secara eksak sebelumnya karena itu prosedur iterasi global diperlukan untuk memenuhi baik kondisi ekuilibrium maupun hubungan konstitutif.

Proses iterasi global dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\underline{K}^j \cdot \delta \underline{v}^j = \underline{f}_{ex}^i - \underline{f}_{in}^{j-1} \quad (5)$$

Notasi j menyatakan nomor iterasi. $\delta \underline{v}$ merupakan sebuah vektor yang memuat perpindahan sub-peningkatan (sub-incremental displacements), yang memberikan kontribusi terhadap peningkatan perpindahan dari langkah i :

$$\Delta \underline{v}^i = \sum_{j=1}^n \delta \underline{v}^j \quad (6)$$

dimana n adalah jumlah iterasi dalam langkah ke i. Matrix kekakuan \underline{K} , seperti yang digunakan pada persamaan (5), menyatakan perilaku material secara pendekatan. Semakin akurat matrix kekakuan, semakin sedikit jumlah iterasi yang diperlukan untuk mencapai ekuilibrium dalam toleransi tertentu.

Untuk kekakuan elastik, matrix kekakuan dapat diformulasikan sebagai :

$$\underline{K} = \int \underline{B}^T \cdot \underline{D}^e \cdot \underline{B} \cdot dV \quad (7)$$

Untuk model material dengan perilaku linier dalam daerah elastik, seperti model Mohr-Coulomb standar, penggunaan matrix kekakuan elastik secara khusus lebih dibutuhkan, karena matrix kekakuan hanya perlu untuk dibentuk dan didekomposisi sebelum langkah perhitungan awal.

Model Material. Model *Mohr-Coulomb* adalah model elastik-plastis yang terdiri dari lima buah parameter, yaitu E (modulus Young) dan ν (angka Poisson) untuk memodelkan elastisitas tanah; ϕ (sudut geser) dan c (kohesi) untuk memodelkan plastisitas tanah dan ψ sebagai sudut dilatansi. Model ini disarankan untuk digunakan dalam analisa awal dari masalah yang dihadapi. Disamping parameter-parameter model di atas, kondisi tegangan awal dari tanah memegang peranan yang penting dalam hampir seluruh masalah deformasi tanah. Tegangan horizontal awal tanah harus dibentuk terlebih dahulu dengan menentukan nilai K_0 (koefisien tekanan tanah lateral) yang tepat.

Prinsip dasar dari model elastik-plastis adalah bahwa regangan dan perubahan regangan dibedakan menjadi bagian yang elastik dan bagian yang plastis :

$$\underline{\underline{\epsilon}} = \underline{\underline{\epsilon}}^e + \underline{\underline{\epsilon}}^p \quad (8)$$

Hukum Hooke digunakan untuk menghubungkan perubahan tegangan dan perubahan regangan elastik :

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{D}}^e * (\underline{\underline{\epsilon}} - \underline{\underline{\epsilon}}^p) \quad (9)$$

Idimana : $\underline{\underline{D}}^e$ adalah matriks kekakuan elastik dari material.

Menurut teori plastisitas klasik, (Hill, 1950), perubahan regangan plastis adalah proporsional terhadap turunan fungsi leleh terhadap tegangan. Hal ini berarti bahwa perubahan regangan plastis dapat dinyatakan sebagai vektor yang tegak lurus terhadap bidang leleh. Bentuk klasik dari teori plastisitas ini disebut sebagai plastisitas terasosiasi (*associated plasticity*). Namun untuk fungsi leleh Mohr-Coulomb, teori plastisitas terasosiasi akan menghasilkan prediksi dilatansi yang berlebihan. Karena itu, selain fungsi leleh, f , digunakan juga sebuah fungsi potensi plastis (*plastic potential function*), g . Kasus dimana $g \neq f$, disebut sebagai plastisitas yang tidak terasosiasi (*non-associated plasticity*). Perubahan regangan plastis dituliskan sebagai :

$$\underline{\underline{\epsilon}}^p = \lambda * \frac{\partial g}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} \quad (10)$$

dimana : λ adalah faktor pengali plastis.

Hubungan perubahan tegangan dan perubahan regangan untuk model elastik-plastis (Smith et al, 1982; Veermer et al, 1984) dituliskan sebagai :

$$\underline{\underline{\sigma}} = \left(\underline{\underline{D}}^e - \frac{\alpha}{d} * \underline{\underline{D}}^e * \frac{\partial g}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} * \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} * \underline{\underline{D}}^e \right) \quad (11)$$

dimana :

$$d = \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} * \underline{\underline{D}}^e * \frac{\partial g}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} \quad (12)$$

Parameter α digunakan sebagai *switch*, jika perilaku material adalah elastik, nilai α akan sama dengan nol, sedangkan untuk perilaku plastis, nilai α akan sama dengan satu.

Model-model tanah lainnya seperti model *Hardening Soil* (isotropis) dan *Soft Soil Creep* akan digunakan sesuai dengan kondisi realistik yang terjadi yaitu saat menerima beban deviator utama, tanah umumnya menunjukkan kekakuan yang semakin berkurang dan secara simultan terbentuk regangan plastis yang tidak dapat kembali seperti semula.

Konsolidasi. Teori konsolidasi mengikuti teori Biot (1956). Hukum Darcy untuk aliran fluida dan perilaku elastis dari butiran tanah juga digunakan dalam asumsi. Formulasi didasarkan pada teori *small strain*. Menurut prinsip dari Terzaghi, tegangan dibedakan menjadi tegangan efektif dan tekanan air pori:

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{\sigma}}' + \underline{\underline{m}} * (p_{steady} + p_{excess}) \quad (13)$$

dimana:

$$\underline{\underline{\sigma}} = (\sigma_{xx} \sigma_{yy} \sigma_{zz} \sigma_{xy} \sigma_{yz} \sigma_{zx})^T \quad \text{dan} \quad \underline{\underline{m}} = (1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)^T \quad (14)$$

$\underline{\sigma}$ adalah vektor tegangan total, $\underline{\sigma}'$ memuat tegangan efektif, p_{excess} adalah tekanan air pori eksess dan \underline{m} adalah vektor yang berisi nilai satu untuk komponen tegangan normal dan nol untuk komponen tegangan geser. Solusi laminer (*steady state solution*) pada akhir dari proses konsolidasi dinotasikan sebagai p_{steady} .

Persamaan konstitutif dituliskan dalam bentuk peningkatkan. Dengan menotasikan peningkatkan tegangan efektif sebagai $\underline{\dot{\sigma}}'$ dan peningkatkan regangan sebagai $\underline{\dot{\epsilon}}$, maka persamaan konstitutif adalah:

$$\underline{\dot{\sigma}}' = \underline{\underline{M}} \cdot \underline{\dot{\epsilon}} \quad (15)$$

dimana:

$$\underline{\dot{\epsilon}} = (\dot{\epsilon}_{xx} \dot{\epsilon}_{yy} \dot{\epsilon}_{zz} \dot{\epsilon}_{xy} \dot{\epsilon}_{yz} \dot{\epsilon}_{zx})^T \quad (16)$$

dan $\underline{\underline{M}}$ menyatakan matriks kekakuan material.

Catatan. Penelitian lebih lanjut setelah pemodelan numerik dan uji skala laboratorium yang dapat dilakukan, antara lain:

1. Penelitian tentang material dari matras lebah,
2. Selain matras lebah yang digunakan sebagai perkuatan tanah pada tanah timbunan (reklamasi dan tanggul: sungai/irigasi) serta perkuatan tanah pada badan jalan, yang diharapkan mencegah kelongsoran maka struktur ini bisa dikembangkan sebagai **fondasi** yg bisa dipakai untuk penelitian mencari solusi fondasi yang lebih murah, efisien dan lebih mudah dipasang.

Penelitian uji skala penuh, penggunaan instrumentasi lapangan, observasi penurunan, perbandingan dengan performance tanah lunak yang tidak pakai sistem ini, pemodelan numerik yang meninjau tidak hanya beban statik, tapi juga beban dinamik, baik itu *traffic* ataupun gempa, akan bisa difahami lebih baik mekanisme bekerjanya sistem perkuatan tanah ini. Hasil uji skala penuh bisa dipakai utk kalibrasi model numerik skala laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

- Brinkgreve, R.B.J., et al (1998), “*PLAXIS – Finite Element Code for Soil and Rock Analyses*”. Rotterdam, Netherlands, A.A. Balkema.
- Darjanto, H., et al, (2007), “Perhitungan dan Analisa Penggunaan Matras Bambu Pada Pekerjaan Peninggian Timbunan Boezem Morokrempangan”. PT. Tamara Engineering Consultant.
- Hill, R., (1950), “*The Mathematical Theory of Plasticity*”. London, UK., Oxford University Press.
- Irsyam, M., (2005), “Kumpulan Laporan dan Penelitian. Tidak dipublikasikan”. Institut Teknologi Bandung.
- Smith, et al, (1982), “*Programming the Finite Element Method*”. 2nd. Chisester, UK., John Wiley & Sons.
- Veermer, P.A., (1979), “A Modified Initial Strain Method for Plasticity Problem”. In: Proceeding 3rd International Conference Numerical Method Geomechanic. Balkema, Rotterdam, pp. 377-387.
- Veermer, P.A., et al (1984), “Non-Associated Plasticity for Soils”. Concrete and Rock, Heron, Vol 29, No. 3.

*KoNTeKS 3, UPH – UAJY
Jakarta, 6 – 7 Mei 2009*