

ASUMSI SISTEM CERUCUK SEBAGAI ALTERNATIF SOLUSI DALAM PENANGANAN KELONGSORAN LERENG JALAN DIATAS TANAH LUNAK

Oleh : Rusdiansyah

Dosen Program Studi Teknik Sipil FT.ULM, Banjarbaru

email:rusdinat@yahoo.com

ABSTRAK : Daya dukung tanah yang rendah merupakan akibat yang ditimbulkan oleh tanah yang memiliki tahanan geser yang rendah. Hal ini karena tahanan geser merupakan unsur utama daya dukung tanah. Tahanan geser yang rendah selalu dimiliki oleh kondisi tanah dengan konsistensi sangat lunak sampai lunak. Upaya untuk meningkatkan tahanan geser tanah lunak yang rendah dapat dilakukan antara lain melalui metode perkuatan tanah. Metode perkuatan tanah bertujuan untuk menambah kekuatan tanah agar lebih mampu mendukung beban yang bekerja padanya. Saat ini tersedia beragam metode perkuatan tanah dengan teknologi yang memadai dan metode tersebut telah berkembang dengan baik. Namun perlu dijadikan perhatian bahwa suatu metode perkuatan tanah tertentu belum tentu cocok untuk jenis tanah yang lain, apalagi bila ada permasalahan spesifik yang ditimbulkan oleh tanah tersebut. Salah satu metode perkuatan tanah yang efektif untuk mengatasi kelongsoran jalan dan stabilitas lereng adalah dengan menggunakan perkuatan tiang-tiang vertikal yang berperilaku seperti sistem cerucuk. Cerucuk memiliki kemampuan yang lebih dibandingkan turap dalam mengatasi *overall stability*. Alasannya berdasarkan pada kemampuan cerucuk yang dapat menghambat pergeseran tanah pada bidang longsornya. Cerucuk dapat dipancang sampai melewati asumsi bidang keruntuhan sirkuler yang terdalam. Pada perencanaan turap, bidang keruntuhan sirkuler yang terdalam tersebut tidak diperlukan. Untuk menunjang perhitungan konstruksi cerucuk yang mendekati kondisi yang ada di lapangan sangat dibutuhkan teori yang relevan mengenai cerucuk. Berdasarkan hasil kajian menunjukkan bahwa apabila *overall stability* lebih menentukan dalam perhitungan stabilitas turap dan penjangkarnya, maka asumsi perhitungan yang lebih mendekati kondisi sebenarnya di lapangan adalah asumsi konstruksi cerucuk. Asumsi cerucuk didasarkan pada kemampuan turap atau tiang berfungsi serupa cerucuk, yang dapat memberikan perlawanan tambahan terhadap geser pada saat akan terjadinya pergeseran keruntuhan menurut asumsi kelongsoran berbentuk lingkaran (*circular sliding plane*). Hal ini apabila panjang turap melebihi asumsi bidang kelongsorannya. Hasil kajian juga menunjukkan bahwa tahanan geser tanah pada stabilitas lereng yang diperkuat dengan cerucuk selain dipengaruhi oleh parameter momen maksimum yang bekerja pada cerucuk (M_{maks}), koefisien momen (F_m), dan faktor kekakuan cerucuk (T), juga dipengaruhi oleh : a) panjang tancap cerucuk, b) jarak

atau spasi antar cerucuk, c) jumlah cerucuk dan faktor efisiensi, d) diameter cerucuk, e) posisi tancap cerucuk, f) pola pemasangan cerucuk, dan g) jenis tanah. Selain itu hasil kajian juga menunjukkan bahwa panjang tancap cerucuk mempengaruhi peningkatan kuat geser tanah, dimana semakin panjang batang cerucuk yang ditancap dibawah bidang kelongsoran maka semakin meningkat pula kuat geser tanah yang dihasilkan. Pada spasi cerucuk sebesar 3D dan 5D yang digunakan, kuat geser tanah menjadi meningkat. Tahanan geser tanah mengalami penurunan disaat spasi cerucuk yang digunakan semakin besar, dalam hal ini spasi cerucuk yang digunakan lebih dari 5D (spasi 8D). Pada spasi cerucuk yang digunakan sebesar 5D dapat menghasilkan kuat geser tanah yang lebih besar. Faktor efisiensi juga dapat mempengaruhi tahanan geser tanah yang diperkuat kelompok cerucuk yang menerima gaya geser horisontal (longsoran). Dimana kemampuan kelompok cerucuk dalam menahan geseran tidak akan sama dengan kemampuan masing-masing cerucuk dikalikan dengan jumlah cerucuk dalam kelompok yang bersangkutan. Faktor efisiensi mempengaruhi tahanan geser tanah yang diperkuat kelompok cerucuk yang menerima gaya geser horisontal (longsoran). Posisi tancap tiang cerucuk terhadap tahanan geser tanah mempunyai pengaruh yang signifikan. Posisi tiang cerucuk yang tepat memotong garis lengkung bidang longsor tanah yang membentuk sudut 30° dan 45° terhadap horisontal menghasilkan tahanan geser yang lebih besar daripada yang dihasilkan pada sudut 0° .

Kata kunci : Cerucuk, tahanan geser tanah, spasi Cerucuk, faktor Efisiensi, posisi cerucuk.

1. PENDAHULUAN

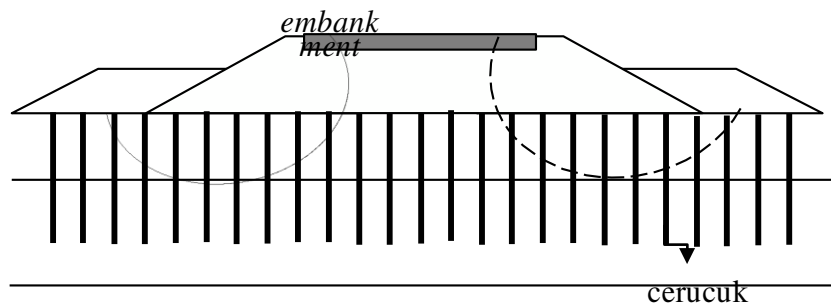
Daya dukung tanah yang rendah merupakan akibat yang ditimbulkan oleh tanah yang memiliki tahanan geser yang rendah. Hal ini karena tahanan geser merupakan unsur utama daya dukung tanah. Tahanan geser yang rendah selalu dimiliki oleh kondisi tanah dengan konsistensi sangat lunak sampai lunak. Tahanan geser tanah yang rendah sering menimbulkan masalah, antara lain terjadinya pergerakan tanah yang berlebihan secara horisontal pada jalan berlereng tinggi dan tidak landai. Masalah lainnya adalah terjadinya kelongsoran lereng. Hal-hal tersebut merupakan dampak dari tahanan geser tanah yang tidak cukup memiliki gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah terhadap desakan atau tarikan akibat beban yang bekerja.

Upaya untuk meningkatkan tahanan geser tanah lunak yang rendah dapat dilakukan antara lain melalui metode perkuatan tanah. Metode perkuatan tanah bertujuan untuk menambah kekuatan tanah agar lebih mampu mendukung beban yang bekerja padanya. Saat ini tersedia beragam metode perkuatan tanah dengan teknologi yang memadai dan metode tersebut telah berkembang dengan baik. Namun perlu dijadikan perhatian bahwa suatu metode perkuatan tanah tertentu belum tentu cocok untuk jenis tanah yang lain, apalagi bila ada permasalahan spesifik yang ditimbulkan oleh tanah tersebut (Rusdiansyah, 2015a).

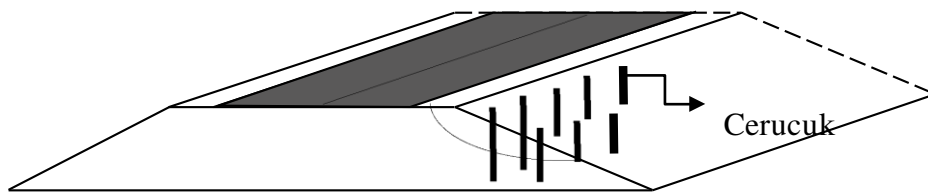
Salah satu metode perkuatan tanah yang efektif untuk mengatasi kelongsoran jalan dan stabilitas lereng adalah dengan menggunakan perkuatan tiang-tiang vertikal yang berperilaku seperti sistem cerucuk. Sistem cerucuk adalah istilah yang dikenal di Indonesia, di mana tiang pancang kecil berdiameter 7,5cm–25cm dipasangkan sebagai group tiang atau tiang satu-satu secara vertikal atau miring. Penggunaan tiang pancang (cerucuk) sebagai elemen penahan tanah sudah dilakukan di masa lalu, karena cara ini dapat memberikan solusi yang efisien, antara lain karena tiang (cerucuk) dapat dilaksanakan dengan mudah tanpa mengganggu keseimbangan lereng (DeBeer dan Wallays, 1970; Ito dkk, 1981). Tiang pancang kayu (cerucuk) pernah digunakan sebagai perkuatan stabilitas lereng tanah yang sangat lunak di Swedia walaupun pada saat itu penggunaan tiang bor dengan diameter 1,5 m sedang populer digunakan di Eropa dan Amerika untuk meningkatkan stabilitas kelongsoran lereng pada tanah lempung kaku (Bulley, 1965, dan Offenberger, 1981).

Selama ini pemakaian cerucuk cukup efektif sebagai metode alternatif perkuatan stabilitas lereng maupun perkuatan *embankment* jalan. Pada *embankment* jalan, cerucuk digunakan sebagai bahan yang kaku berfungsi untuk menaikkan stabilitas tanah. Adanya cerucuk di bawah *embankment* jalan (ilustrasi seperti dalam Gambar 1) dapat meningkatkan daya dukung tanah dasar dan mengurangi penurunan yang akan terjadi. Hal ini karena cerucuk dapat menghasilkan hambatan terhadap keruntuhan geser. Sebagai perkuatan lereng, cerucuk sangat efektif berfungsi sebagai pasak/tulangan yang dapat memotong bidang kelongsoran lereng (ilustrasi seperti dalam Gambar 2 dan 3). Jadi, cerucuk dapat memberikan tambahan gaya geser pada lereng dan mampu melawan gaya geser longsor yang terjadi. Tambahan gaya geser yang dihasilkan oleh cerucuk tersebut dapat meningkatkan angka keamanan (*safety factor*) stabilitas lereng.

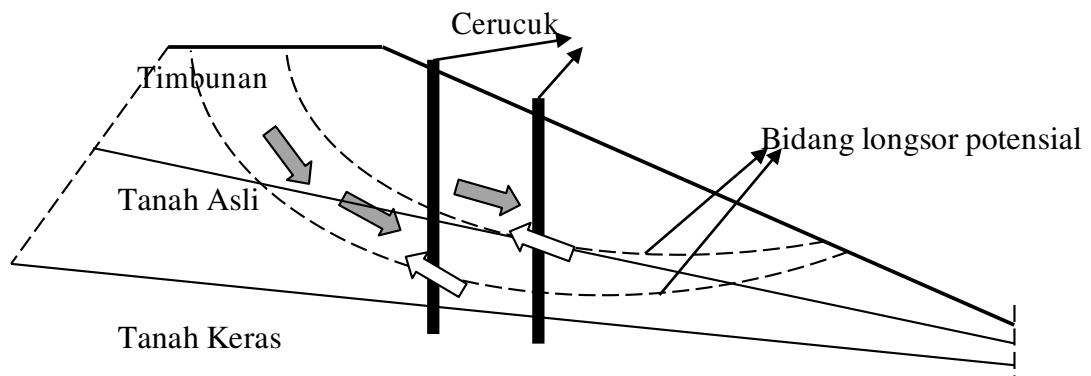
Pada awalnya penggunaan cerucuk terbuat dari bahan kayu. Pengalaman menunjukkan pemakaian bahan seperti kayu mempunyai keterbatasan tentang umur material, memerlukan pemeliharaan dan penggantian dengan kayu yang baru dalam jangka waktu tertentu. Selain itu juga panjang batang kayu yang utuh (tanpa sambungan) umumnya terbatas (Rusdiansyah, 2015b).



Gambar 1 Ilustrasi penggunaan cerucuk untuk *embankment* jalan

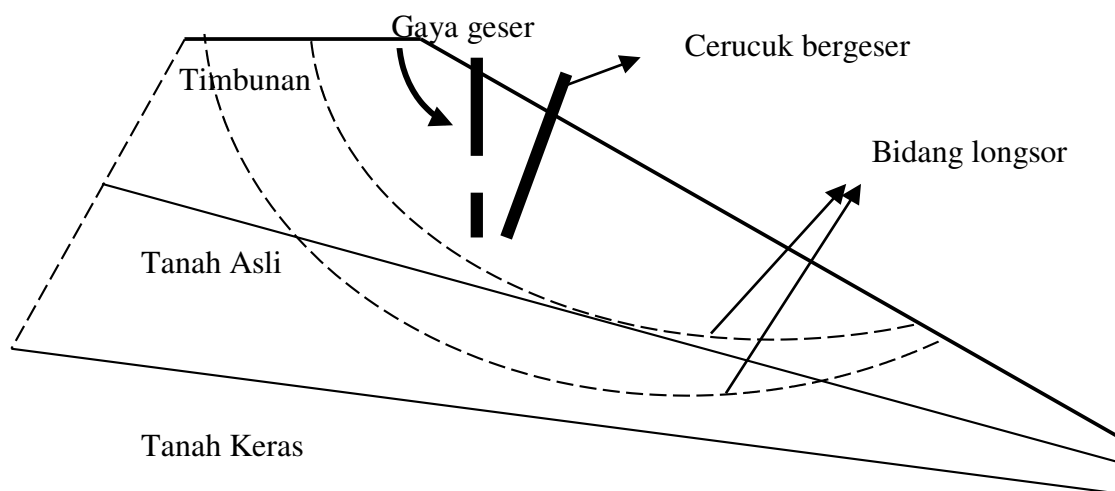


Gambar 2 Ilustrasi penggunaan cerucuk sebagai perkuatan lereng *embankment* jalan



Gambar 3 Ilustrasi penggunaan cerucuk sebagai perkuatan lereng yang dapat memotong lingkaran kelongsoran dalam

Dalam aplikasi selanjutnya di lapangan, penggunaan tiang pancang sebagai cerucuk tidak lagi terbatas hanya pada penggunaan cerucuk kayu saja. Pada kondisi bila tinggi timbunan makin tinggi akan terjadi kemungkinan bidang kelongsoran yang makin dalam. Kondisi seperti ini tidak memungkinkan penggunaan cerucuk kayu karena cerucuk kayu memiliki panjang terbatas ($L = 3\text{m}$ sampai 6m) padahal panjang cerucuk harus melampaui bidang gesernya. Hal ini dapat mengakibatkan cerucuk kayu bergeser/longsor bersama dengan bidang tanah yang longsor (Gambar 4). Tiang cerucuk dapat diganti dengan tiang pancang mini (minipiles) dari beton atau pipa baja dengan panjang 6m sampai 12m dan dapat disambung, karena panjang cerucuk harus melebihi bidang kelongsoran yang terdalam. Disini cerucuk merupakan tiang pondasi yang berfungsi sebagai perkuatan stabilitas lereng.



Gambar 4 Ilustrasi penggunaan cerucuk sebagai perkuatan lereng yang tidak memotong lingkaran kelongsoran dalam

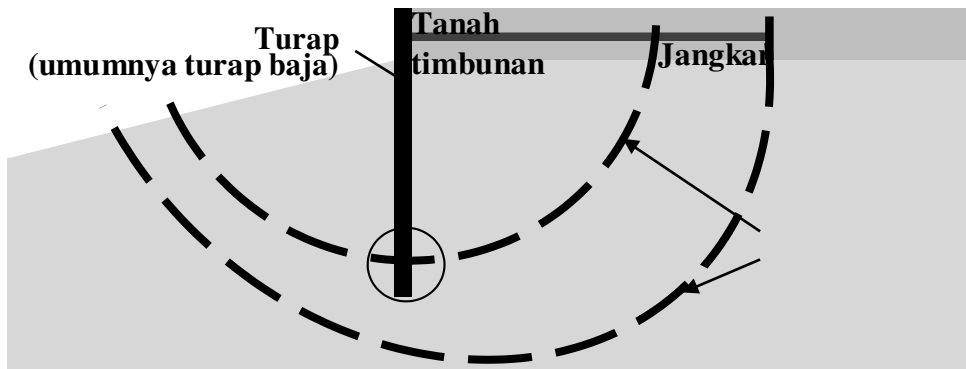
Beberapa kajian penanganan kelongsoran jalan dan stabilitas talud di lapangan menunjukkan bahwa cerucuk telah terbukti dapat meningkatkan tahanan geser tanah, (Mochtar, 2011). Selain itu juga dijelaskan oleh Mochtar (2011) bahwa pada banyak kasus penggunaan turap sebagai dinding penguat didalam tanah yang lunak ternyata *overall stability*-nya lebih menentukan bagi stabilitas turap. Walaupun perhitungan secara turap sudah memenuhi syarat tetapi pada kenyataannya turap tersebut mengalami keruntuhan dengan bidang keruntuhan diperkirakan melewati bawah kaki turap. Pada kondisi seperti ini asumsi yang lebih mendekati kondisi sebenarnya di lapangan adalah asumsi konstruksi cerucuk. Cerucuk memiliki kemampuan yang lebih dibandingkan turap dalam mengatasi *overall stability*. Alasannya berdasarkan pada kemampuan cerucuk yang dapat menghambat pergeseran tanah pada bidang longsonya. Cerucuk dapat dipancang sampai melewati asumsi bidang keruntuhan sirkuler yang terdalam. Pada perencanaan turap, bidang keruntuhan sirkuler yang terdalam tersebut tidak diperlukan.

2. Fakta Kelemahan Penggunaan Turap Dalam Mengatasi Kelongsoran Lereng

Berdasarkan observasi di lapangan bahwa penanganan kelongsoran lereng dengan tanah sangat lunak cukup tebal yang telah diatasi dengan pemasangan turap, peristiwa kelongsoran ataupun pergerakan tanah yang berlebihan secara horisontal masih tetap saja terjadi. Menurut Mochtar (2011) ada beberapa hal yang menjelaskan hal tersebut, yaitu :

1. Perhitungan turap pada daerah yang memiliki lapisan tanah-tanah yang sangat lunak yang cukup tebal umumnya **yang lebih menentukan adalah overall stability dari sistem konstruksi tanah dan turap**. Jadi perencanaan turapnya sendiri seringkali telah memenuhi syarat, tetapi overall stability-nya yang tidak memenuhi syarat, sebagaimana yang terlihat pada Gambar 5.
2. Bila overall stability lebih menentukan dalam perhitungan stabilitas turap dan penjangkarnya, maka asumsi perhitungan yang lebih mendekati kondisi sebenarnya di lapangan adalah asumsi konstruksi cerucuk. Asumsi cerucuk didasarkan pada kemampuan turap atau tiang berfungsi serupa cerucuk, yang dapat memberikan perlawanan tambahan terhadap geser pada saat akan terjadinya pergeseran keruntuhan menurut asumsi kelongsoran berbentuk lingkaran (*circular sliding plane*). Hal ini apabila panjang turap melebihi asumsi bidang kelongsorannya.
3. Dengan kondisi *overall stability* lebih menentukan, apabila salah satu bidang kelongsoran (dengan $SF < 1,0$) ternyata melampaui ujung terdalam dari turap, jelas turap tidak akan berfungsi sebagai penahan geser sama sekali. Jadi asumsi turap tidak dapat digunakan.

Semua uraian diatas menunjukkan bahwa masih perlu adanya pemahaman yang cukup dan memadai tentang metode perkuatan tanah yang tersedia dan kesesuaiannya dalam mengatasi permasalahan di lapangan.



Bidang kelongsoran

**Panjang turap
harus melebihi
bidang kelongsoran**

Gambar 5 Persyaratan overall stability untuk turap

3. Kelemahan Asumsi Teori Tiang Lateral Bila Digunakan Pada Cerucuk yang Memperkuat Stabilitas Lereng

Selama ini secara praktis tiang yang berfungsi sebagai perkuatan stabilitas lereng dianalisis dengan menggunakan teori tiang lateral. Teori tiang pancang penahan gaya horisontal oleh NAVFAC DM-7 (1971) adalah cukup sering diaplikasikan dalam desain cerucuk penahan longsor.

Rusdiansyah (2015) menyatakan bahwa ada beberapa kelemahan asumsi apabila cerucuk yang berfungsi sebagai penahan kelongsoran lereng menggunakan teori tiang lateral, yaitu :

- Asumsi letak gaya geser horisontal maksimum pada cerucuk tidak selamanya berada pada kepala tiang seperti halnya pada tiang yang berfungsi sebagai tiang lateral.
- Letak bending moment dan defleksi maksimum cerucuk sangat tergantung kedalaman tancap cerucuk yang dapat memotong bidang geser kelongsoran. Hal ini berbeda dengan tiang yang berfungsi sebagai tiang lateral dimana bending moment dan defleksi maksimum sangat tergantung pada kondisi kepala tiang (*free head/fixed head/rotational head*).

Sehingga apabila analisis desain cerucuk yang memperkuat stabilitas lereng masih menggunakan teori tiang pancang penahan gaya horisontal maka hasil perhitungan berpotensi menjadi *underestimate* (Rusdiansyah, 2015).

4. Perlunya Formula Cerucuk yang Relevan untuk Mengatasi Kelongsoran Lereng

Untuk menunjang perhitungan konstruksi cerucuk yang mendekati kondisi yang ada di lapangan sangat dibutuhkan teori yang relevan mengenai cerucuk. Teori tentang cerucuk dalam perhitungan perkuatan tanah lunak untuk menambah kekuatan geser relatif sangat sedikit dan kurang memadai. Padahal pengetahuan mendalam mengenai mekanisme peningkatan tahanan geser tanah lunak akibat adanya cerucuk sangat diperlukan agar perancangan perkuatan tanah dengan cerucuk lebih akurat.

Cukup banyak penelitian di laboratorium maupun di lapangan yang menunjukkan bahwa pengaruh gaya lateral tanah pada tiang adalah berbeda-beda pada beberapa kasus, dan belum ada teori secara menyeluruh yang dapat mengembangkan teori untuk penggunaan secara praktis (Chen, 1994). Beberapa hasil penelitian mengenai tiang lateral berupa analisis teori maupun metode empiris telah dikembangkan oleh para peneliti selama ini namun hal itu berlaku hanya untuk kasus dan permasalahan tertentu saja, sebagai contoh : Poulus (1995), Poulus dan Chen (1996, 1997), dan Chen dan Poulus (1996).

Teori-teori tentang cerucuk yang ada saat ini masih sangat sedikit dan masih belum relevan untuk diaplikasikan di lapangan. Teori penambahan tahanan geser dari tanah akibat adanya cerucuk oleh Mochtar (2000) masih didasarkan pada teori tiang pancang penahan gaya horizontal oleh NAVFAC DM-7 (1971). Kemudian juga hasil koreksi dan pengembangan teori Mochtar (2000) oleh Mochtar dan Arya (2002) juga masih belum memuaskan dan belum mendekati kejadian sebenarnya di lapangan.

Dalam analisis perkuatan lereng dengan menggunakan cerucuk diperlukan gaya yang bekerja pada cerucuk akibat massa tanah yang menekan cerucuk (tahanan geser tanah) dan hasil reaksi cerucuk didalam lereng. Gaya akibat tekanan massa tanah (tahanan geser tanah) pada barisan cerucuk dapat diwakili oleh kekuatan tanah, diameter cerucuk, panjang tancap cerucuk, jumlah cerucuk, dan jarak antar cerucuk (Ito dkk, 1981; Yang dkk, 2011)

Perkembangan Teori mengenai Cerucuk Dan Parameter yang Mempengaruhi Faktor

Keamanan (SF) Stabilitas Lereng yang diperkuat dengan Cerucuk

Ada beberapa parameter yang dapat mempengaruhi interaksi lereng-cerucuk di lapangan. Parameter-parameter tersebut adalah : 1) pengaruh panjang atau kedalaman cerucuk, 2) pengaruh jenis tanah, 3) pengaruh diameter dan kekakuan cerucuk, 4) pengaruh posisi cerucuk, 5) pengaruh jumlah cerucuk, 6) pengaruh spasi cerucuk, dan 7) pengaruh konfigurasi cerucuk kelompok terhadap arah gaya geser yang bekerja.

Teori Mochtar (2000)

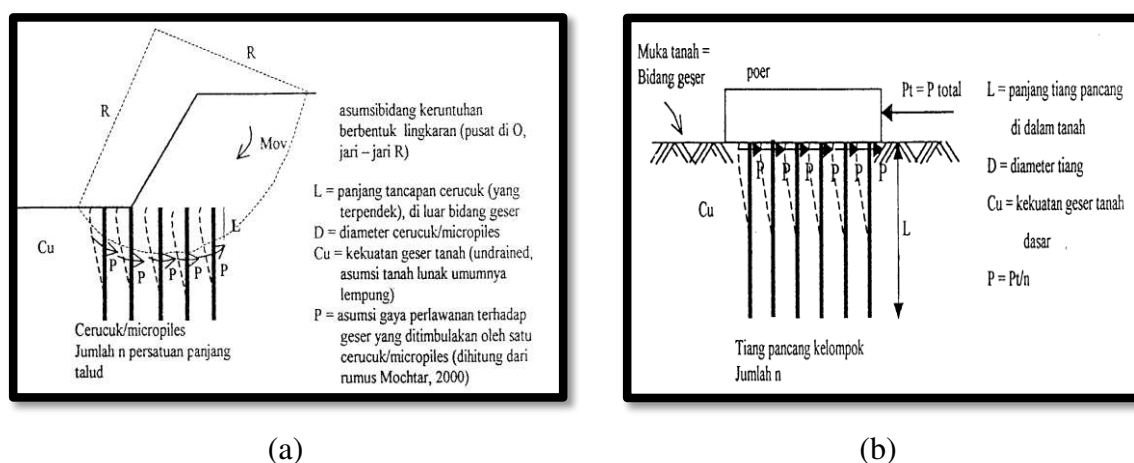
Cerucuk digunakan dengan tujuan untuk meningkatkan tahanan geser tanah. Apabila komponen tahanan tanah terhadap geser meningkat maka daya dukung tanah juga menjadi meningkat. Cerucuk dapat berfungsi menahan gaya geser lebih besar dibandingkan dengan tanah.

Mochtar (2000) telah mengembangkan teori penambahan tahanan geser dari tanah akibat adanya cerucuk. Teori ini berdasarkan pada teori tiang pancang penahan gaya horisontal oleh NAVFAC DM-7 (1971). Pada teori tersebut daya dukung geser tiang pancang terhadap gaya lateral pada suatu tanah dipengaruhi oleh : kekakuan dan kekuatan lentur dari tiang pancang tersebut, panjang penetrasi tiang yang masuk pada tanah diukur dari permukaan tanah, kekuatan geser tanahnya sendiri, dan jumlah tiang pancang. Berdasarkan

teori tiang pancang ini Mochtar (2000) mengembangkan teori penambahan tahanan geser dari tanah akibat adanya cerucuk.

Dalam Gambar 6a dan Gambar 6b asumsi-asumsi yang digunakan dalam teori penambahan tahanan geser dari tanah akibat adanya cerucuk oleh Mochtar (2000) adalah sebagai berikut :

1. Kelompok cerucuk dianggap sebagai kelompok tiang dengan *rigid cap* di muka tanah yang menerima gaya horisontal.
2. Gaya horisontal tersebut merupakan tegangan geser yang terjadi di sepanjang bidang gelincir.



Gambar 6.

- (a). Asumsi kedudukan cerucuk/micropiles sebagai penahan terhadap keruntuhan geser di lapangan
- (b). Asumsi tiang pancang kelompok menahan gaya lateral yang digunakan sebagai dasar mencari tahanan geser cerucuk (Mochtar 2000, dari NAVFAC DM-7, 1971)

Dalam teori Mochtar (2000) untuk menghitung kebutuhan cerucuk per-meter, terlebih dahulu ditentukan kekuatan 1(satu) cerucuk untuk menahan gaya horisontal. Pada Persamaan (1) menunjukkan gaya horisontal (P) yang mampu ditahan oleh 1(satu) cerucuk. Dalam persamaan tersebut, gaya horisontal (P) adalah merupakan fungsi perbandingan dari momen lentur yang bekerja pada cerucuk akibat beban P (M_p) dengan koefisien momen akibat gaya lateral P (F_M) dan faktor kekakuan relatif (T).

$$P_{\max} \text{ 1 cerucuk} = \frac{M_{p_{\max}}}{F_M \times T} \text{ 1cerucuk} \quad (1)$$

$$F_M \times T$$

dengan :

Mpmax	= momen tarik max yang bekerja pada cerucuk akibat beban P, kg-cm
FM	= koefisien momen akibat gaya lateral P
Pmax	= gaya horisontal maksimum yang diterima cerucuk, kg
T	= faktor kekakuan relatif, cm

5. Hasil Penelitian mengenai Teori Cerucuk oleh Rusdiansyah (2015)

Rusdiansyah (2015) telah melakukan penelitian interaksi tiang cerucuk dan tanah dengan berbagai perilaku selama kurang lebih 3(tiga) tahun (Tahun 2012-2015) dan mendapatkan hasil penelitian mengenai teori cerucuk. Teori-teori cerucuk yang dimaksud diantaranya diuraikan berikut ini.

Pengaruh Panjang Tancapan Cerucuk terhadap Peningkatan Tahanan Geser Tanah

Berdasarkan hasil penelitian ditunjukkan bahwa tahanan geser tanah lunak mengalami peningkatan seiring dengan semakin meningkatnya nilai rasio tancap (L/D) yang digunakan. Hal ini disebabkan karena dengan semakin besarnya nilai rasio tancap berarti semakin panjang tiang cerucuk yang menancap (tertanam) dibawah bidang geser (bidang longsor). Dengan semakin panjang tiang cerucuk yang tertanam maka semakin besar pula daerah kerja (daerah perlawanan) atau reaksi lateral yang dimiliki cerucuk untuk menghambat pergeseran tanah. Sehingga penambahan tahanan geser yang dihasilkan oleh cerucuk menjadi semakin besar. Pada nilai rasio tancap yang sama, cerucuk-cerucuk yang menggunakan spasi 5D menghasilkan tahanan geser tanah yang lebih besar dibandingkan dengan spasi cerucuk sebesar 3D dan 8D.

Hasil yang sama juga telah ditunjukkan dalam penelitian Ashour dan Ardalan (2012), serta Kourkoulis, et al (2011). Ashour dan Ardalan (2012) dalam penelitiannya menyebutkan bahwa kedalaman cerucuk pada sistem lereng yang diperkuat cerucuk harus tertanam pada tanah yang stabil dibawah permukaan bidang gelincir. Hal ini karena dapat memperkecil deformasi yang terjadi pada cerucuk. Selain itu juga menurut Kourkoulis, et al (2011) menyatakan bahwa semakin dalam cerucuk yang ditancapkan dibawah permukaan bidang kelongsoran maka semakin kecil deformasi yang akan terjadi pada bagian kepala cerucuk.

Pengaruh Spasi Cerucuk terhadap Peningkatan Tahanan Geser Tanah

Untuk rentang spasi cerucuk sebesar 3D sampai 5D, nilai rasio $P_{lab}/P_{analitis}$ (tahanan geser tanah) mengalami peningkatan. Namun apabila cerucuk menggunakan spasi dalam rentang 5D sampai 8D maka tahanan geser tanah cenderung mengalami penurunan. Selain itu juga dapat disimpulkan bahwa cerucuk dengan spasi 5D dapat menghasilkan tahanan geser tanah yang optimum.

Berdasarkan hasil analisis menunjukkan bahwa apabila cerucuk menggunakan spasi antara 3D sampai 5D, kekuatan geser tanah menjadi meningkat. Hal ini disebabkan karena

pada rentang spasi tersebut kinerja kelompok cerucuk lebih maksimal memberikan efek pasak pada perkuatan tanah. Kondisi ini juga menunjukkan bahwa pada jarak (spasi) tersebut dapat menghasilkan tahanan yang optimal antara tiang-tiang cerucuk terhadap dorongan (gaya geser) yang terjadi. Selain itu juga bahwa spasi yang rapat (3D sampai 5D) dapat memperkecil deformasi yang terjadi pada tanah. Kondisi ini disebabkan karena spasi yang rapat dapat meningkatkan gaya penahan geser. Hal ini bersesuaian dengan hasil penelitian dari Kourkoulis, et al (2011), Yang, et al (2011), dan Ito, et al (1981). Dimana menurut Kourkoulis, et al (2011) bahwa spasi cerucuk yang kecil (rapat) dapat meningkatkan gaya penahan geser, memperkecil momen lentur, dan memperkecil deformasi pada bagian kepala cerucuk. Seperti juga Yang et al (2011) telah menyatakan bahwa spasi cerucuk yang kecil (rapat) dan modulus Young cerucuk yang besar dapat meningkatkan kemampuan stabilitas lereng yang menghasilkan faktor keamanan lereng yang semakin besar.

Ito, et al (1981) juga telah menyatakan bahwa spasi (jarak) antar cerucuk dapat memberikan pengaruh yang besar terhadap stabilitas kelongsoran. Faktor keamanan (SF) stabilitas lereng-cerucuk akan meningkat seiring dengan meningkatnya rasio D_2/D_1 (D_2 adalah jarak antar cerucuk diukur dari sisi terluar cerucuk yang saling berdekatan, D_1 adalah jarak antar titik pusat penampang cerucuk).

Bahwa cerucuk dengan spasi dalam rentang 5D sampai 8D, tahanan geser tanah mengalami penurunan karena pada spasi tersebut jarak antar cerucuk relatif tergolong besar (tidak rapat), sehingga tiang-tiang cerucuk berperilaku hampir seperti tiang cerucuk tunggal (individu) yang tidak terikat oleh sesamanya. Kondisi ini mengakibatkan dorongan dari tanah (gaya geser) tidak ditahan secara maksimal oleh cerucuk kelompok itu sendiri dan sebagian dari mobilisasi gaya geser yang akan terjadi akan mudah melalui ruang diantara tiang-tiang cerucuk. Selain itu menurut Ashour dan Ardalan (2012), Jeong, et al (2003) dan Won, et al (2005) telah menyatakan bahwa spasi cerucuk yang meningkat (tidak rapat) akan menurunkan faktor keamanan (SF) stabilitas lereng.

Pengaruh Jumlah Cerucuk terhadap Peningkatan Tahanan Geser Tanah

Dalam rangka untuk mengetahui pengaruh jumlah cerucuk dalam menerima gaya geser horisontal maka dilakukan pengujian geser dengan perlakuan variasi jumlah cerucuk. Jumlah cerucuk yang diterapkan yaitu 1 batang, 2 batang, 4 batang, dan 6 batang. Adapun macam arah pemberian gaya geser horisontal terbagi atas 2 (dua) macam, yaitu 1) arah gaya geser diberikan sejajar/paralel terhadap baris kelompok cerucuk dimana pola baris x kolom yang digunakan yaitu 1x1, 1x2, 1x3, 1x4, 1x5, dan 1x6 batang cerucuk, dan 2) arah gaya geser diberikan tegak lurus terhadap baris kelompok cerucuk dimana pola baris x kolom yang digunakan yaitu 1x1, 2x1, 3x1, 4x1, 5x1, dan 6x1 batang cerucuk. Untuk masing-masing benda uji dengan perlakuan yang diseragamkan yaitu : diameter cerucuk sebesar 3mm, spasi (jarak antar) cerucuk kelompok sebesar 5D ($5 \times \text{diameter}$), dan rasio tancap cerucuk (L/D)=15.

Apabila ditinjau berdasarkan arah gaya geser yang diberikan terhadap baris kelompok cerucuk, besaran tahanan geser tanah-cerucuk yang menerima gaya geser arah sejajar menghasilkan nilai 1,17 kali lebih besar daripada menerima gaya geser arah tegak lurus.

Perbedaan nilai tahanan geser tanah akibat pengaruh arah gaya geser tersebut relatif kecil dan tidak signifikan.

Berdasarkan hasil penelitian ditunjukkan bahwa semakin banyak jumlah cerucuk dalam kelompok cerucuk maka semakin mengecil nilai efisiensi kelompok cerucuk tersebut. Hal ini bersesuaian dengan hasil penelitian Ilyas, et al (2001) dimana untuk grup tiang dengan jarak antar tiang 3D grup efisiensi menurun dengan bertambahnya jumlah tiang dalam grup. Keadaan ini dapat berarti bahwa kemampuan kelompok cerucuk dalam menahan geseran tidak akan sama dengan kemampuan masing-masing cerucuk dikalikan dengan jumlah cerucuk dalam kelompok yang bersangkutan. Kondisi ini menunjukkan bahwa jumlah cerucuk dalam kelompok didalam tanah untuk menahan gaya geser horisontal ternyata menghasilkan kondisi yang disebut dengan fenomena *shadowing effect*. Berdasarkan hasil penelitian Ilyas, et al (2003) dinyatakan bahwa fenomena *shadowing effect* terjadi karena adanya kecenderungan tiang rear/trail menahan lateral yang lebih kecil dibandingkan dengan tiang yang berada dimukanya (tiang lead/front). Hal ini akibat dari adanya variasi tegangan yang berbeda pada *soil-piles interactions* pada setiap tiang didalam pile group.

Berdasarkan hasil analisis dihasilkan persamaan efisiensi jumlah cerucuk yang melawan gaya geser horisontal dalam bentuk : $Y_n = 1,051 - 0,047(X_n)$, dimana X_n = jumlah cerucuk.

Pengaruh Diameter Cerucuk terhadap Peningkatan Tahanan Geser Tanah

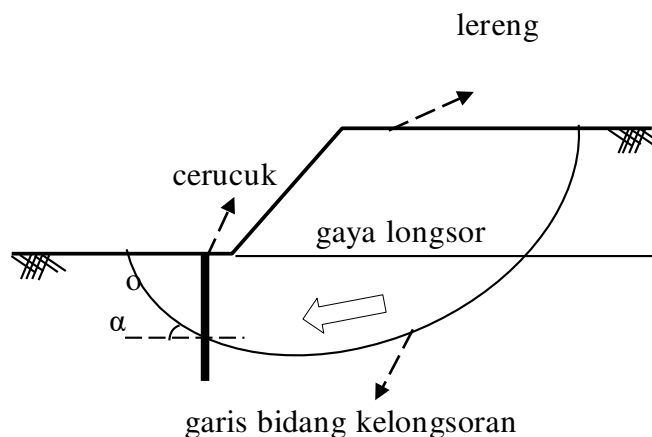
Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa semakin besar diameter maka semakin besar pula tahanan geser tanah yang menghasilkan kontribusi cerucuk untuk memberikan perlawanan terhadap gaya geser horisontal yang terjadi. Kondisi ini terjadi disebabkan karena semakin besar diameter tiang cerucuk yang digunakan berarti kekakuan yang dimiliki oleh tiang cerucuk tersebut semakin meningkat, sehingga memperbesar kemampuan tiang cerucuk tersebut untuk menghasilkan penahan momen dan geser dari cerucuk untuk melawan geseran yang terjadi. Dalam hasil penelitian lain telah disampaikan oleh Ito, et al (1981), dan Won, et al (2005). Menurut Ito, et al (1981) menyatakan bahwa pada penggunaan diameter dan kekakuan cerucuk yang semakin besar akan dapat meningkatkan faktor keamanan stabilitas lereng tersebut. Sedangkan menurut Won, et al (2005) telah menyimpulkan bahwa kekakuan cerucuk dapat mempengaruhi perpindahan cerucuk didalam lereng, dimana semakin kaku cerucuk maka semakin kecil perpindahan cerucuk yang akan terjadi.

Pengaruh Posisi Tancap Cerucuk terhadap Peningkatan Tahanan Geser Tanah

Untuk mengetahui pengaruh posisi atau lokasi tancap cerucuk terhadap peningkatan tahanan geser tanah pada stabilitas lereng yang akan mengalami kelongsoran, maka tiang cerucuk ditancah tepat pada posisi memotong garis bidang longsor yang membentuk sudut

(α) yang bervariasi. Variasi sudut garis kelongsoran (α) yang diterapkan adalah 0^0 , 15^0 , 30^0 , dan 45^0 terhadap garis horisontal. Pada Gambar 7 ditunjukkan ilustrasi posisi tiang cerucuk memotong garis kelongsoran yang memiliki kemiringan sudut α di lapangan.

Dalam pengujian di laboratorium, masing-masing benda uji dengan perlakuan variasi sudut garis kelongsoran (α) menggunakan parameter pengujian yang sama yaitu : batang cerucuk berdiameter 3mm, jumlah tiang cerucuk sebanyak 2 batang (pola pemasangan baris x kolom : 1x2), rasio tancap sebesar $(L/D)=15$, spasi antar sebesar $5D$, dan arah gaya geser yang diberikan sejajar kelompok baris cerucuk.



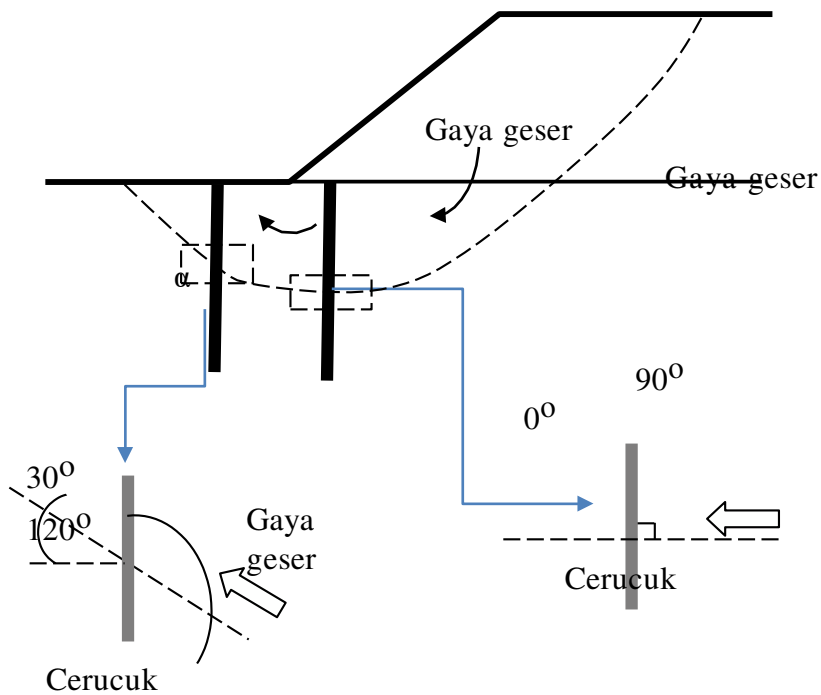
Gambar 7 Ilustrasi posisi tiang cerucuk pada garis kelongsoran dengan sudut α di lapangan

Berdasarkan studi dijelaskan dalam bahwa tahanan geser tanah mengalami peningkatan bila tiang cerucuk dipancang tepat memotong garis bidang kelongsoran pada sudut 15^0 , 30^0 , dan 45^0 dibandingkan pada sudut 0^0 . Cerucuk yang dipancang memotong garis kelongsoran yang membentuk sudut sebesar 45^0 , nilai rasio $P_{lab}/P_{analitis}$ sedikit mengalami penurunan dibandingkan yang dihasilkan oleh sudut 30^0 .

Berdasarkan hal tersebut dapat dinyatakan bahwa apabila tiang cerucuk dipancang pada posisi tepat memotong garis bidang kelongsoran yang memiliki sudut 30^0 dan 45^0 terhadap garis horisontal maka tahanan geser tanah menjadi meningkat. Dalam hal ini parameter rasio $P_{lab}/P_{analitis}$ merupakan interpretasi dari tahanan geser tanah dalam menahan kelongsoran. Selain itu juga dapat dinyatakan bahwa posisi cerucuk tepat memotong garis bidang kelongsoran dengan sudut 0^0 adalah dalam kondisi kritis (minimum) dimana mobilisasi gaya geser lateral dalam kondisi maksimum dari massa tanah longsor.

Peningkatan tahanan geser tanah akibat adanya cerucuk yang dipancang tepat memotong garis bidang longsor yang memiliki sudut 30^0 dan 45^0 adalah sangat signifikan. Kondisi ini terjadi karena pada saat massa tanah mengalami pergeseran garis lingkaran kelongsoran, posisi cerucuk yang berada pada garis bidang longsonya yang memiliki sudut

30° dan 45° telah membentuk daerah kerja (luasan) massa tanah bersudut tumpul yang relatif lebih besar dibandingkan daerah kerja (luasan) massa tanah yang dihasilkan oleh sudut 0° (lihat ilustrasi dalam Gambar 8). Hal ini mengakibatkan posisi cerucuk yang memotong garis kelongsoran bersudut 30° dan 45° dapat menghasilkan posisi yang lebih stabil serta dapat meningkatkan tahanan geser tanah menjadi lebih besar.



Gambar 8 Ilustrasi daerah kerja (luasan) variasi sudut garis kelongsoran

Apabila posisi cerucuk diletakkan tepat memotong garis bidang longsor yang memiliki sudut 45^0 maka tahanan geser tanah yang dihasilkan lebih kecil daripada yang dihasilkan oleh sudut 30^0 . Kondisi ini terjadi antara lain karena sudut terhadap horisontal yang terbentuk oleh kedua besaran sudut tersebut merupakan fungsi matematis trigonometri fungsi Cosinus (Cos). Dimana nilai $\text{Cos } 45^0 (\approx 0.707)$ adalah lebih kecil daripada nilai $\text{Cos } 30^0 (\approx 0.866)$.

Penelitian yang terkait dengan pengaruh posisi cerucuk juga telah dilaporkan oleh Lee, et al (1995), dan Jeong, et al (2003). Menurut Lee, et al (1995) bahwa faktor keamanan stabilitas lereng yang maksimal dapat dihasilkan oleh cerucuk yang diposisikan pada lokasi dekat kaki lereng maupun kepala (atas) lereng dibandingkan tepat ditengah lereng. Dimana posisi cerucuk yang lebih mendekati dengan kaki lereng akan menghasilkan faktor keamanan (SF) yang paling efektif. Selain itu Jeong, et al (2003) juga telah melaporkan bahwa apabila posisi cerucuk diletakkan diantara sisi tengah lereng dan sisi kaki lereng akan menghasilkan faktor keamanan stabilitas lereng yang efektif. Namun faktor keamanan stabilitas lereng akan menurun bila posisi cerucuk terletak diantara sisi tengah lereng dan sisi atas lereng (kepala lereng).

Pengaruh Pola Pemasangan Cerucuk terhadap Peningkatan Tahanan Geser Tanah

Benda uji dengan perlakuan variasi pola pemasangan cerucuk dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap peningkatan tahanan geser tanah. Adapun variasi pola pemasangan cerucuk yang diterapkan adalah pola persegi baris x kolom kelompok tiang cerucuk yaitu: 1) pola 2x3 dan pola 1x6 (dimana arah gaya geser yang diberikan sejajar terhadap baris kelompok tiang cerucuk), dan 2) pola 3x2 dan pola 6x1 (dimana arah gaya geser yang diberikan tegak lurus terhadap baris kelompok tiang cerucuk). Masing-masing benda uji dari pola pemasangan tersebut menggunakan parameter pengujian yang dibuat sama, yaitu: diameter tiang sebesar 3mm, rasio tancap sebesar $(L/D)=15$, spasi antar tiang cerucuk sebesar 5D, serta jumlah tiang cerucuk sebanyak 6 batang. Berdasarkan hasil penelitian dapat dinyatakan bahwa pola pemasangan tiang cerucuk 2x3 menghasilkan tahanan geser tanah 1,13 kali lebih besar dibandingkan dengan pola pemasangan tiang cerucuk 3x2. Demikian juga dengan tahanan geser tanah yang dihasilkan pada pola pemasangan tiang cerucuk 1x6 adalah 1,13 kali lebih besar daripada pola pemasangan tiang cerucuk 6x1.

Jadi, pola pemasangan tiang cerucuk 2x3 dan 1x6 dapat menghasilkan tahanan geser tanah yang lebih besar daripada pola pemasangan 3x2 dan 6x1. Hal ini terjadi karena pada

pola-pola pemasangan 2x3 dan 1x6 kemampuan tiang-tiang cerucuk dalam menghasilkan mobilisasi perlawanan terhadap gaya geser horisontal (longsoran) menjadi lebih maksimal. Adanya jumlah cerucuk yang lebih banyak dalam arah sejajar untuk melawan gaya longsoran pada pola pemasangan 2x3 dan 1x6 mampu meningkatkan tahanan geser tanah. Oleh sebab itu pada pola pemasangan 2x3 dan 1x6 saat mengalami deformasi akibat adanya gaya longsoran maka menghasilkan tegangan geser yang dihasilkan cerucuk untuk menahan geseran sebesar 1,13 kali lebih besar dibandingkan pada pola pemasangan tiang cerucuk 3x2 dan 6x1. Perbedaan nilai tahanan geser tanah akibat pengaruh pola pemasangan ini relatif kecil dan tidak signifikan. Sehingga hal ini dapat diabaikan.

Pengaruh Jenis Tanah terhadap Peningkatan Tahanan Geser Tanah

Dalam rangka untuk mendapatkan informasi mengenai pengaruh jenis tanah yang ditancapi oleh cerucuk terhadap tahanan geser tanah maka dilakukan pengujian model benda uji tanah-cerucuk dengan variasi jenis tanah. Variasi jenis tanah yang digunakan dalam pengujian ini adalah *Medium Clay* dan *Soft Clay*. Sedangkan parameter pengujian dengan besaran yang dibuat tetap yaitu: jumlah batang cerucuk yang berdiameter 3mm sebanyak 4 batang (pola pemasangan baris x kolom : 1x4), rasio tancap yang diterapkan (L/D) sebesar 15, serta arah gaya geser yang diberikan adalah sejajar terhadap baris kelompok tiang cerucuk.

Berdasarkan hasil kajian maka dapat dinyatakan bahwa jenis tanah mempengaruhi tahanan geser tanah yang dihasilkan oleh sistem tanah-cerucuk baik cerucuk yang menggunakan spasi sebesar 3D maupun 5D. Cerucuk yang dipasang pada jenis tanah *Medium Clay* menghasilkan tahanan geser tanah yang lebih besar dibandingkan pada jenis tanah *Soft Clay*. Hasil penelitian yang hampir serupa juga telah dilaporkan oleh Ashour dan Ardalan (2012), serta Kourkoulis, et al (2011). Dimana menurut Ashour dan Ardalan (2012) bahwa apabila jenis tanah yang berada diatas permukaan bidang gelincir tergolong tanah yang tidak menguntungkan (jelek) maka akan menghasilkan tekanan yang besar terhadap cerucuk. Sedangkan menurut Kourkoulis, et al (2011) telah menyimpulkan bahwa apabila lapisan tanah memiliki ketebalan yang tipis maka cerucuk berperilaku seperti rigid dan menyerupai perilaku dinding penahan tanah atau pondasi kaisson, sehingga efek dari cerucuk kelompok menjadi tidak berpengaruh. Sebaliknya apabila ketebalan lapisan tanah besar (tebal), maka cerucuk berperilaku fleksibel dan efek cerucuk kelompok menjadi berpengaruh.

Berdasarkan hasil analisa penelitian ditunjukkan pula bahwa besaran prosentasi penambahan gaya geser akibat adanya cerucuk didalam masing-masing variasi jenis tanah dan variasi spasi cerucuk. Berdasarkan tabel tersebut dapat dijelaskan bahwa prosentasi penambahan gaya geser yang dihasilkan oleh cerucuk yang berada didalam tanah *Medium Clay* adalah lebih kecil daripada didalam tanah *Soft Clay*. Hal ini dapat dinyatakan pula bahwa penambahan cerucuk didalam jenis tanah *Soft Clay* berpengaruh lebih besar daripada penambahan cerucuk didalam jenis tanah *Medium Clay*. Kondisi ini terjadi disebabkan oleh adanya kekuatan cerucuk yang berperan sebagai tulangan (*reinforcement*) pada tanah, dimana pada jenis tanah *Soft Clay* (Cu yang kecil) pengaruh tulangan tersebut lebih berfungsi maksimal dan lebih besar daripada jenis tanah *Medium Clay*.

Usulan Model Persamaan Peningkatan Tahanan Geser Tanah Akibat Adanya Cerucuk

Berdasarkan hasil analisa perhitungan persamaan koreksi pada sub-sub bab sebelumnya maka Persamaan NAVFAC DM.7 perlu dikoreksi menjadi model persamaan baru dalam rangka peningkatan tahanan geser tanah stabilitas lereng akibat adanya cerucuk yang lebih mendekati dengan kondisi di lapangan. Persamaan NAVFAC DM.7 dikoreksi dengan mengalikan faktor koreksi berupa persamaan model regresi dari hasil kurva hubungan tahanan geser tanah masing-masing parameter rasio tancap, spasi, diameter, dan jumlah cerucuk seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Pada Tabel 1 ditunjukkan model persamaan regresi masing-masing perlakuan cerucuk.

Tabel 1 Model Persamaan Cerucuk Untuk Masing-masing Variasi Perlakuan

Variasi Perlakuan Cerucuk	Model Persamaan
Rasio Tancap(X_t)	$Y_t = 0,1(X_t) - 0,35$ ($Y_t = 1$ bila $X_t = 15$), (untuk $0 < L/D < 5$, $Y_t = 0.02 X_t$),
Spasi(X_s)	$Y_s = -0.057(X_s)^2 + 0.614(X_s) - 0.658$ ($Y_s = 1$ bila $X_s = 5$)
Jumlah (x_n)	$Y_n = -0.047x_n + .051$ ($Y_n = 1$ bila $X_n = 1$)
Diameter(X_D)	$Y_D = 46.616(X_D) - 3.582$ ($Y_D = 1$ bila $X_D = 0.126$), (Y_D min = 1.0 ; Y_D max = 1.70)

dengan nilai rata-rata $P_{lab}/P_{analitis}$ dari semua variasi dalam Tabel 5.18 adalah sebesar **2,30**.

Sehingga model persamaan peningkatan tahanan geser tanah akibat adanya cerucuk (koreksi persamaan NAVFAC DM.7) menjadi :

$$P_{\max} (1 \text{ cerucuk}) = \frac{M_{p\max} (1 \text{ cerucuk}) \times Fk_g}{f_m T}$$

dimana :

$F_{kg} = 2.30 \cdot Y_t \cdot Y_D \cdot Y_s \cdot Y_n$ (dengan syarat spasi yang digunakan : 3D sampai 8D)

F_{kg}	= faktor koreksi gabungan
Y_t	= persamaan pengaruh rasio tancap cerucuk (Tabel 1)
X_t	= rasio tancap (L/D)
Y_D	= persamaan pengaruh diameter cerucuk
(Tabel 1) X_D	= rasio D/T
Y_s	= persamaan pengaruh spasi/jarak antar cerucuk (Tabel 1)
X_s	= spasi (S/D)
Y_n	= persamaan pengaruh jumlah cerucuk (Tabel 1)
X_n	= Jumlah Cerucuk
P_{max} (1 cerucuk)	= gaya horisontal maksimum yang diterima cerucuk, kg
M_{pmax}	= momen lentur yang bekerja pada cerucuk akibat P (kg.cm).
f_m	= koefisien momen akibat gaya lateral P (dari kurva NAVFAC DM.7-1971)
T	= Faktor kekakuan relatif, cm (dari kurva NAVFAC DM.7-1971)
D	= diameter cerucuk, cm
E	= modulus elastisitas tiang (cerucuk), kg/cm ²
I	= momen inersia tiang (cerucuk), cm ⁴
f	= koefisien dari variasi modulus tanah, kg/cm ³

dengan syarat:

- spasi cerucuk yang digunakan : 3D sampai 8D
- rasio tancap yang digunakan: $L/D=5$ s.d. $L/D=20$
Untuk nilai $L/D < 5$ maka digunakan persamaan $Y_t = 0.02(X_t)$. Sedangkan untuk nilai $L/D > 20$ maka digunakan nilai $Y_t \leq 1.45$.
- rasio D/T yang digunakan: 0.099 s.d. 0.113
($Y_D = 1.0$ jika $D/T = 0.1$)
($Y_D \text{ min} = 1.0$; $Y_D \text{ max} = 2.0$.)

6. Keandalan Model Persamaan Peningkatan Tahanan Geser Tanah Akibat Adanya

Cerucuk

Model persamaan peningkatan tahanan geser tanah akibat adanya cerucuk (koreksi persamaan NAVFAC DM.7) dalam bahasan dibawah ini selanjutnya disebut sebagai Rumus Cerucuk 2015. Rumus Cerucuk 2015 tersebut dapat dikatakan andal apabila dalam aplikasinya telah dihasilkan nilai yang lebih aman dan besaran nilai tersebut mendekati nilai yang dihasilkan oleh metode umum lainnya. Uji keandalan rumus cerucuk 2015 dimaksudkan sebagai langkah untuk menguji model persamaan cerucuk yang dapat menghasilkan kesimpulan yang lebih meyakinkan. Uji keandalan dilakukan dengan cara membandingkan nilai yang dihasilkan melalui rumus cerucuk 2015 dan nilai yang dihasilkan dari beberapa rumus atau metode lainnya yang telah umum digunakan untuk menanggulangi kelongsoran lereng. Metode yang dimaksud tersebut yaitu : metode Broms (tiang lateral) dan metode numerik melalui GeoSlope versi 7.10-2007.

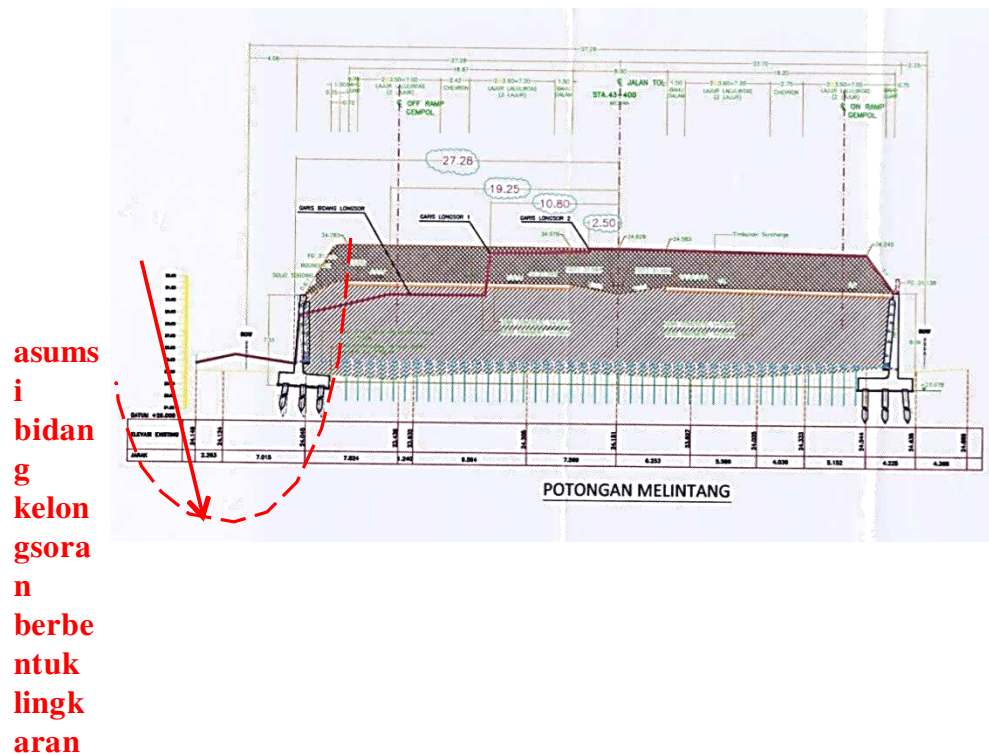
Untuk menunjang perhitungan keandalan rumus cerucuk 2015 dengan metode perbandingan, contoh kasus nyata kelongsoran di lapangan ditentukan sebagai bahan kajiannya. Dalam tulisan ini dipilih salah satu contoh kasus nyata kelongsoran badan jalan pada Proyek Pembangunan Relokasi Jalan Tol Surabaya-Gempol, Provinsi Jawa Timur (Tahun 2014) sebagai permasalahan yang diatasi dengan menggunakan alternatif perkuatan cerucuk. Deskripsi singkat keadaan proyek jalan tol tersebut yaitu pada beberapa waktu di tahun 2014 yang lalu kemajuan fisik Pembangunan Relokasi Jalan Tol Surabaya-Gempol, Provinsi Jawa Timur sudah dalam tahap pembangunan badan jalan dengan penimbunan urugan pilihan setinggi 11,10 m. Badan jalan tersebut telah diperkuat dengan dinding penahan tanah yang ditopang oleh 3 buah pondasi tiang pancang sedalam lebih dari 12 m. Pada bagian tanah dasarnya juga telah dilakukan perbaikan tanah dengan preloading dan PVD-PHD. Namun pada kenyataannya selama dalam masa pembangunan proyek jalan tol tersebut di beberapa bagian sisi badan jalan telah mengalami kelongsoran dalam. Pada saat itu diprediksi tanah dasar telah mengalami derajat konsolidasi sebesar 60%. Dalam Gambar 9, 10 dan 11 ditunjukkan dokumentasi dan ilustrasi kondisi kelongsoran yang terjadi di lapangan. Berdasarkan analisis Mochtar (2014) bahwa penanganan kelongsoran tersebut dapat diatasi antara lain menggunakan alternatif perkuatan dengan cerucuk.



Gambar 9. Kelongsoran badan jalan dan dampak kelongsoran terhadap rumah di dekat area kelongsoran. (Mochtar, 2014)



Gambar 10. Kelongsoran badan jalan pada area lainnya.
(Mochtar, 2014)



Gambar 11. Potongan melintang badan jalan Tol dan asumsi kelongsoran badan jalan

Tol berbentuk lingkaran untuk *overall stability*. (Mochtar, 2014)

Pada Tabel 2 ditunjukkan perbandingan jumlah cerucuk dan SF hasil perhitungan rumus cerucuk 2015 dan metode-metode umum lainnya. Berdasarkan tabel tersebut dapat dinyatakan bahwa jumlah cerucuk yang dihasilkan melalui perhitungan cara Broms (rumus tiang lateral) adalah hampir mendekati sama dengan jumlah tiang pancang (cerucuk) pondasi dinding penahan tanah jalan Tol Surabaya-Gempol yang telah terpancang, yaitu 3(tiga) batang. Pada kenyataannya jumlah tiang pancang (cerucuk) tersebut tidak mampu melawan gaya longsor sehingga terjadilah kelongsoran pada badan jalan tol tersebut. Hal ini

mengindikasikan bahwa cara Broms relatif belum tepat dipakai sebagai rumusan cerucuk untuk menahan kelongsoran lereng dalam.

Selain itu berdasarkan Tabel 2 juga ditunjukkan bahwa jumlah cerucuk yang dihasilkan oleh metode numerik dengan bantuan perangkat lunak GeoSlope adalah sebanyak 4 batang. *Safety factor* (SF) yang dihasilkan melalui metode tersebut sebesar 1,118. Angka *safety factor* (SF) yang dihasilkan tersebut adalah lebih besar daripada Angka *safety factor* (SF) yang dihasilkan melalui rumus cerucuk 2015. Padahal Angka *safety factor* (SF) yang diperoleh melalui rumus cerucuk 2015 sebesar 1,100 dapat menghasilkan jumlah cerucuk yang lebih banyak (sebanyak 5 batang) daripada jumlah cerucuk berdasarkan metode numerik dengan perangkat lunak GeoSlope (4 batang untuk nilai SF sebesar 1,118). Sehingga berdasarkan hal tersebut maka jumlah cerucuk yang dihasilkan melalui rumus cerucuk 2015 dapat dikatakan relatif lebih aman daripada rumus/metode lainnya. Hal ini karena rumus cerucuk 2015 yang dihasilkan dalam disertasi ini menggunakan variabel faktor koreksi yang berpengaruh di lapangan, seperti faktor rasio tancap cerucuk, spasi cerucuk, diameter cerucuk, jumlah cerucuk, dan faktor efisiensi. Berdasarkan uraian diatas maka dapat dinyatakan bahwa rumus cerucuk 2015 lebih andal dan lebih meyakinkan daripada rumus/metode lainnya.

Tabel 2 Perbandingan Jumlah Cerucuk dari Beberapa Metode

No	Metode/ Formula	SF (Safety Factor)	Jumlah Cerucuk Minimal (batang)	
			Hasil Desain	Dibulatkan
1.	Cara Broms, 1964 (Rumus Tiang Lateral)	1,100	2.46	3
2.	Numeric by GeoSlope Versi 7.10-2007	1,118	4.00	4
3.	Rumus Cerucuk 2015	1,100	4.60	5

8. Kesimpulan

Berdasarkan uraian diatas, ada beberapa hal yang dapat dijadikan kesimpulan, yaitu :

1. Bila overall stability lebih menentukan dalam perhitungan stabilitas turap dan penjangkarnya, maka asumsi perhitungan yang lebih mendekati kondisi sebenarnya di lapangan adalah asumsi konstruksi cerucuk. Asumsi cerucuk didasarkan pada kemampuan turap atau tiang berfungsi serupa cerucuk, yang dapat memberikan perlawanan tambahan terhadap geser pada saat akan terjadinya pergeseran keruntuhan menurut asumsi kelongsoran berbentuk lingkaran (*circular sliding plane*). Hal ini apabila panjang turap melebihi asumsi bidang kelongsorannya.
2. Cerucuk memiliki kemampuan yang lebih dibandingkan turap dalam mengatasi *overall stability*. Alasannya berdasarkan pada kemampuan cerucuk yang dapat menghambat pergeseran tanah pada bidang longsonya. Cerucuk dapat dipancang sampai melewati asumsi bidang keruntuhan sirkuler yang terdalam. Pada perencanaan turap, bidang keruntuhan sirkuler yang terdalam tersebut tidak diperlukan.
3. Tahanan geser tanah pada stabilitas lereng yang diperkuat dengan cerucuk selain dipengaruhi oleh parameter momen maksimum yang bekerja pada cerucuk (M_{maks}), koefisien momen (F_m), dan faktor kekakuan cerucuk (T), (Mochtar, 2000), juga dipengaruhi oleh : a) panjang tancap cerucuk, b) jarak atau spasi antar cerucuk, c) jumlah cerucuk dan faktor efisiensi, d) diameter cerucuk, e) posisi tancap cerucuk, f) pola pemasangan cerucuk, dan g) jenis tanah
4. Panjang tancap cerucuk mempengaruhi peningkatan kuat geser tanah, dimana semakin panjang batang cerucuk yang ditancap dibawah bidang kelongsoran maka semakin meningkat pula kuat geser tanah yang dihasilkan.
5. Pada spasi cerucuk sebesar 3D dan 5D yang digunakan, kuat geser tanah menjadi meningkat. Kuat geser tanah mengalami penurunan disaat spasi cerucuk yang digunakan semakin besar, dalam hal ini spasi cerucuk yang digunakan lebih dari 5D (spasi 8D).
6. Spasi cerucuk yang digunakan sebesar 5D dapat menghasilkan kuat geser tanah yang lebih besar.
7. Faktor efisiensi juga dapat mempengaruhi tahanan geser tanah yang diperkuat kelompok cerucuk yang menerima gaya geser horisontal (longsoran).

Dimana kemampuan kelompok cerucuk dalam menahan geseran tidak akan sama dengan kemampuan masing- masing cerucuk dikalikan dengan jumlah cerucuk dalam kelompok yang bersangkutan. Faktor efisiensi mempengaruhi tahanan geser tanah yang diperkuat kelompok cerucuk yang menerima gaya geser horisontal (longsoran). Nilai faktor efisiensi relatif semakin menurun seiring dengan semakin bertambahnya jumlah cerucuk didalam kelompoknya untuk menahan geseran horisontal. Besaran penurunan nilai faktor efisiensi yang terjadi sebesar 4,02%.

8. Posisi tancap tiang cerucuk terhadap tahanan geser tanah mempunyai pengaruh yang signifikan. Posisi tiang cerucuk yang tepat memotong garis lengkung bidang longsor tanah yang membentuk sudut 30^0 dan 45^0 terhadap horisontal menghasilkan tahanan geser yang lebih besar daripada yang dihasilkan pada sudut 0^0 .
9. Usulan model persamaan untuk menentukan jumlah cerucuk (koreksi empiris terhadap rumus NAVFAC DM.7) adalah sebagai berikut :

$$P_{\max (1 \text{ cerucuk})} = \frac{M p_{\max (1 \text{ cerucuk})}}{f m T} \times F k_g$$

Dimana Fkg = Faktor Koreksi Gabungan

9. Saran

1. Dalam prakteknya, rumus cerucuk (2015) tersebut disarankan memasukkan faktor keamanan (SF), yaitu :

$$SF = 2,0$$

(untuk muatan sementara dari bangunan yang relative kaku seperti gedung, bangunan beton dan bata)

$$SF = 3,0$$

(untuk muatan tetap dari bangunan yang relatif kaku seperti gedung, bangunan beton dan bata)

$$SF = 1,25$$

(untuk muatan sementara dari bangunan yang agak *flexible* seperti embankment jalan dan tanggul tanah.

$$SF = 1,5$$

(untuk muatan tetap dari bangunan yang agak *flexible* seperti embankment jalan

dan tanggul tanah.

2. Dalam perancangan panjang cerucuk, rasio panjang tiang terhadap diameter untuk perkuatan (cerucuk) ditentukan oleh panjang tiang tancap yang terpendek (panjang tiang yang berada dibawah bidang geser kelongsoran).

10. DAFTAR PUSTAKA

1. Ashour M dan Ardalan H, (2012) *Analysis of pile stabilized slopes based on soil-pile interaction*, Computers and Geotechnics-ELSEVIER, 39:85-97.
2. Bulley, W.A., (1965) *Cylindrical Pile Retaining Wall Construction-Seattle Freeway*, Paper presented at Roads and Streets Conference, Seattle, Washington.
3. DeBeer, E. E., dan Wallays, M., (1970), *Stabilization of a slope in schist by means of bored piles reinforced with steel beams*, Proceeding 2nd International Congress Rock Mechanics, Vol. 3, 361-369.
4. Ito, T., Matsui, T., dan Hong, W. P., (1981), *Design method for stabilizing piles against landslide - one row of piles*, *Soils and Foundations*, Vol.21, No.1, pp.21-37.
5. Ito, T., Matsui, T., dan Hong, W. P., (1982), *Extended design method for multi-row stabilizing piles against landslide*, *Soils and Foundations*, Vol.22, No. 1, pp. 1-13.
6. Ilyas, T., dan Supanji, B.S., 2001, Kinerja Grup Tiang Yang Menerima Beban Lateral Di Lapisan Lempung : Studi Model Centripuge, *Makalah Seminar Nasional HATTI, Bandung 7-8 Nopember 2001*.
7. Ilyas, T., dan Hardjanto., 2003, Analisis Perilaku Pile Cap dari Group Tiang Terhadap Beban Lateral Statis : Studi pada Tanah Lempung dengan Memperhatikan "Shadowing Effect", *Prosiding Konferensi Geoteknik Indonesia VI dan Pertemuan Ilmiah Tahunan VII, Jakarta 11-13 Agustus 2003*, ISBN 979-96668-3-X.
8. Kourkoulis, R., Gelagoti, F., Anastasopoulos, I., dan Gazetas, G., (2011), *Slope stabilizing piles and pile-groups, Parametric study and design insights*, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(7), 663-678.

9. 9. Mochtar, I. B., (2000), *Teknologi Perbaikan Tanah dan Alternatif Perencanaan pada Tanah Bermasalah (Problematic Soils)*, Penerbit Jurusan Teknik Sipil FTSP-ITS, Surabaya.
10. 10. Mochtar, I. B. dan Arya I.W., (2002), *Pengaruh penambahan cerucuk terhadap peningkatan kuat geser tanah lunak pada pemodelan di laboratorium*, Tesis Bidang
11. Geoteknik, Program Studi Teknik Sipil, Program Pascasarjana ITS Surabaya.
12. 11. Mochtar, I. B., (2010), *Masalah Pergerakan Tanah dan Turap Baja di Lereng Tebing Dekat Gedung Squash, Kota Balikpapan*, Laporan Penyelidikan oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat LPPM, ITS, untuk Pemda Kota Balikpapan.
13. 12. Mochtar, I. B., (2011), *Kajian Kelongsoran Jalan dan Stabilitas Talud Pada Proyek Pembangunan Jalan dengan Turap, Sepanjang Lokasi Jln.Marsma.Iswahyudi, STA 0+000 s/d 0+796, Kota Tanjung Redeb, Kabupaten Berau, Kalimantan Timur*. Laporan Penyelidikan oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat LPPM, ITS, untuk Pemkab Berau.
14. 13. NAVFAC DM-7, (1971), *Design Manual, Soil Mechanics, Foundation and Earth Structures*, Depth. Of the Naval Facilities Engineering Command, Virginia, USA.
15. 14. Offenberger, J.H, (1981), *Hillside stabilized with concrete cylinder pile retaining wall*, Public Works, Vol. 112, No. 9, pp. 82-86.
16. 15. Rusdiansyah (2015a), *Studi Peningkatan Tahanan Geser Tanah Kohesif Akibat Adanya Perkuatan Tiang-Tiang Vertikal Berdasarkan Pemodelan Di Laboratorium*, Disertasi Doktor, Jurusan Teknik Sipil, FTSP, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.
17. 16. Rusdiansyah, Indrasurya B. Mochtar, Noor Endah Mochtar (2015b), *Efek Panjang Tancap Dan Spasi Cerucuk Dalam Peningkatan Tahanan Geser Tanah Lunak Berdasarkan Pemodelan Di Laboratorium*, Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil XI ITS, 18 Januari 2015, Surabaya. (Predikat:Pemakalah Terbaik I)
18. 17. Rusdiansyah, Noor Endah Mochtar, Indrasurya B. Mochtar, (2015c), *Pengaruh Pola Pemasangan Dan Faktor Efisiensi Kelompok Cerucuk Dalam Peningkatan Tahanan Geser Tanah Lunak Berdasarkan Pemodelan Di Laboratorium*,

Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Prasarana Wilayah-2015, Program Diploma Teknik Sipil ITS, 11 Juni 2015, Surabaya.

28. 18. Rusdiansyah, Indrasurya B. Mochtar, Noor Endah Mochtar (2015d), *Pengaruh Kedalaman Tancap, Spasi, Dan Jumlah Cerucuk Dalam Peningkatan Tahanan Geser Tanah Lunak Berdasarkan Pemodelan Di Laboratorium*, Prosiding Seminar Nasional dan Pameran Teknik, Prodi S1 Teknik Sipil UNLAM dan Himpunan Ahli Kontruksi Indonesia (HAKI) Kalimantan Selatan, 16-17 Oktober 2015, Banjarbaru.
29. 19. Rusdiansyah (2015e), *Mekanisme Peningkatan Tahanan Geser Tanah Lunak Lahan*
30. *Basah Dengan Menggunakan Cerucuk Berdasarkan Pemodelan Skala Di Laboratorium*, Prosiding Seminar Nasional FKPTPI, 29-30 September 2015, Banjarbaru
31. 20. Rusdiansyah, Indrasurya B. Mochtar, Noor Endah Mochtar (2016b), *A Formula For The*
32. *Increase of Shear Resistance of Soft to Medium Cohesive Soils Due to Reinforcement*
33. *With Piles (An Experiment With Laboratory Modeling of Pile-Soil Interaction)*, ARPN Journal, Under Review (Index on SCOPUS).
34. 21. Rusdiansyah, Indrasurya B. Mochtar, Noor Endah Mochtar (2016a), *Study on The*
35. *Increament of Shear Resistance of Soft Soil due to Vertical Piles Reinforcement Based on*
36. *Modeling in laboratory*, International Journal of Applied Engineering Research, Volume
37. 11 No.8 (2016) pp 5934-5942, (Index on SCOPUS).
38. 22. Rusdiansyah, Indrasurya B. Mochtar, Noor Endah Mochtar (2016c), *A Formula For The Increase of Shear Resistance of Soft to Medium Cohesive Soils Due to Reinforcement With Piles (An Experiment With Laboratory Modeling of Pile-Soil Interaction)*, Proceeding 2nd International Conference on Civil Engineering Research (ICCER), 27
39. Januari
2016,
Surabaya.
40. 23. Wei W.B. dan Cheng Y.M., (2009), *Strength reduction analysis for slope reinforced with*
41. *one row of piles*, Computers and Geotechnics-ELSEVIER, Vol.36 : 1176-1185.