

EFEKTIFITAS MATERIAL RINGAN MORTAR-BUSA SEBAGAI TIMBUNAN OPRIT PADA KONSTRUKSI STRUKTUR TURAP (EFFECTIVENESS OF FOAMED MORTAR LIGHT WEIGHT FILLS AS AN APPROACH BRIDGE FILL ON SHEET-PILE STRUCTURES)

Suantoro Wicaksono¹⁾, Maulana Iqbal²⁾

^{1,2)}Balai Geoteknik, Terowongan dan Struktur, Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan

^{1,2)} Jl. A.H. Nasution No.264 Bandung

e-mail: ¹⁾suantoro.wicaksono@pu.go.id, ²⁾maulanaiqbal@pu.go.id

Diterima: 29 September 2020; direvisi: 2 November 2020; disetujui: 17 Desember 2020

ABSTRAK

Salah satu permasalahan di bidang geoteknik pada oprit jembatan adalah penurunan dan pengaruh tekanan lateral akibat dampak penurunan konsolidasi terhadap stabilitas abutment jembatan. Untuk timbunan yang relatif tinggi seperti timbunan oprit, perlu diperhatikan stabilitas lereng karena akan dapat mengalami keruntuhan dalam. Timbunan oprit menggunakan material pilihan dengan berat isi antara 1,6 – 1,8 t/m³ berdampak menimbulkan masalah tekanan lateral yang besar. Penggunaan timbunan ringan mortar busa dapat mereduksi pengaruh tekanan lateral, bahkan secara teoritis tidak ada karena proses pengerasan seperti halnya beton sehingga tidak ada tekanan lateral. Studi kasus dilakukan pada oprit Jembatan Randu Merak, Probolinggo, Provinsi Jawa Timur untuk mengevaluasi efektifitas mortar busa pada bidang kontak antara mortar busa dan turap dipasang instrumen pressure cell untuk memantau tekanan lateral yang terjadi. Pressure cell ditempatkan pada dasar timbunan berdekatan dengan turap dan yang lainnya pada sheet pile. Dengan membandingkan besarnya tekanan lateral yang terjadi akibat beban timbunan oprit jembatan dengan menggunakan tanah sebagai timbunan dan material ringan mortar-busa maka diketahui efektifitasnya dengan membandingkan reduksi tekanan lateralnya. Tekanan lateral pada timbunan tanah dihitung secara teoritis, sedangkan tekanan lateral pada timbunan ringan didapatkan dari hasil bacaan pressure cell. Berdasarkan hasil perhitungan tekanan lateral maksimum yang ditimbulkan akibat timbunan tanah adalah sebesar 29,58 kPa, sedangkan dari hasil bacaan pressure cell besarnya tekanan lateral yang ditimbulkan akibat timbunan ringan sebesar 1,37 kPa. Sehingga didapatkan bahwa penggunaan timbunan ringan mortar-busa dapat mereduksi nilai tekanan lateral hingga sebesar 95,36 %. Demikian pula halnya dengan tekanan aksial diperoleh reduksi tekanan hampir hampir 80,00%.

Kata Kunci: tekanan lateral, turap (sheet pile), timbunan pilihan, material ringan, mortar-busa, timbunan oprit

ABSTRACT

One of the problems in the Geotechnical Engineering in approach bridge is the settlement and effect of lateral pressure due to the impact of embankment consolidation on the stability of bridge abutments. For relatively high embankments such as approach bridge fills, it's necessary to pay attention to the stability of the slope because it will encounter internal collapse. Approach bridge fills that using selected materials with fill weights between 1.6-1.8t /m³ cause major lateral stress problems. The use of lightweight foam mortar can reduce the effect of lateral stress, even theoretically, it doesn't exist due to the hardening process such as concrete so that there is no lateral stress. A case study was conducted at the Randu Merak Approach Bridge, Probolinggo, East Java Province to evaluate the effectiveness of the foam mortar in the contact area between the foam mortar and sheet piles. A pressure cell instrument was installed to monitor the lateral pressure. Pressure cells are placed at the base of the embankment adjacent to the sheet sheet pile and others on the sheet pile. By comparing the magnitude of the lateral stress that occurs due to the load of the approach bridge using soil as embankment and mortar-foam light weight material, its effectiveness is known by comparing the lateral stress reduction. Lateral pressure on soil embankment is calculated theoretically, while lateral pressure on light embankment is obtained from the pressure cell reading. Based on the results of the calculation of the maximum lateral pressure caused by landfills is 29.58 kPa, while from the results of the pressure cell readings the magnitude of the lateral pressure caused by light embankment is 1.37 kPa. So that it is found that the use of lightweight mortarfoam can reduce the value of lateral stress by up to 95.36%. Likewise with axial pressure, the pressure reduction was almost 80.00%.

Keywords: lateral pressure, sheet-pile, selected fills, light weight fills, foamed-mortar, approach bridge fills

PENDAHULUAN

Penurunan stabilitas lereng terjadi diakibatkan oleh oleh menurunnya nilai kuat geser penahan lereng dan dapat terjadi pada kasus timbunan yang berada diatas lapisan tanah lunak akibat dampak dari penurunan konsolidasi berlebih dikarenakan beban timbunan tidak mampu didukungnya. Tanah lunak umumnya berupa tanah lempung kohesif (*cohesive soils*) mempunyai karakteristik sangat kompresibel sehingga parameter kuat gesernya sangat rendah. Ketidak-stabilan lereng timbunan yang mengalami longsor (umumnya longsor rotasi) ini terjadi karena bertambahnya gaya momen pendorong yang lebih besar dari momen penahannya. Momen pendorong diakibatkan oleh berat tanah yang meningkat terutama dalam kondisi jenuh dan momen penahan adalah gaya reaksi dari kohesi tanah sepanjang bidang lemah pada lereng. Dengan demikian menunjukkan bahwa stabilitas lereng timbunan pada tanah lunak sangat dipengaruhi oleh kenaikan beban yang menyebabkan meningkatnya momen pendorong yang tidak mampu ditahan oleh kekuatan geser sepanjang bidang lemah.

Selanjutnya bilamana ketidak-stabilan lereng timbunan dilakukan penanganan dengan tiang atau turap maka perlu dilakukan pula analisis keseimbangan antara tekanan tanah aktif dan pasifnya. Demikian pula dengan stabilitas lereng di morfologi penguungan atau perbukitan baik lereng alam atau lereng buatan, peningkatan ketidak-stabilan lereng khususnya terhadap ketidak-stabilan lereng dengan bidang longsor yang tidak selalu berbentuk rotasional, maka perlu diperhitungkan terhadap keseimbangan gaya akibat tekanan tanah aktif dan tekanan tanah pasif.

Usaha yang sering dilakukan untuk menangani ketidak-stabilan lereng timbunan dengan mengurangi beban yang berimbas pada longsor adalah juga menerapkan tiang (*pile*) sebagai penahan beban timbunan yang menyebabkan naiknya gaya momen pendorong atau naiknya gaya tekanan tanah aktif yang bekerja.

Salah satu metoda teknik penanganan dengan mengurangi beban salah satunya dengan penggunaan material ringan berupa teknologi mortar-busa telah dikaji dan diterapkan sebagai advis teknik oleh Pusjatan untuk mengatasi permasalahan daya dukung dan penurunan, terutama pada oprit jembatan dan overpass yang dibangun pada tanah dengan daya dukung rendah.

Dengan memperhatikan bahwa timbunan oprit pada jembatan umumnya berada pada lapisan tanah lunak dan mempunyai sifat sensitifitas dan kompresibilitas tinggi sehingga nilai parameter kuat gesernya (kohesi dan sudut geser dalam) sangat rendah. Bilamana tanah lunak ini tidak mampu mendukung beban timbunan maka akan terjadi keruntuhan timbunan. Demikian juga halnya seperti timbunan oprit jembatan maka akan berdampak pada keruntuhan timbunan yang disebabkan karena penurunan yang sangat besar sehingga berdampak pada peningkatan gaya lateral aktif yang melebihi gaya lateral pasifnya.

Beberapa lokasi di Indonesia telah cukup banyak diterapkan timbunan ringan berupa mortar-busa baik sebagai timbunan jalan maupun oprit jembatan, diantaranya: oprit Jembatan Kedaton pada ruas jalan Cirebon – Indramayu (2007), ruas jalan nasional yang merupakan akses ke pelabuhan di Pangkalan Bun Kalimantan Tengah (2009); timbunan oprit jembatan pada jalan nasional di Lahat Sumatera Selatan (2010); beberapa timbunan oprit salah satunya jembatan Kang Boy Pangkal Pinang Kepulauan Riau tahun 2012; serta timbunan oprit overpass Antapani, Bandung pada tahun 2017.

Faktor penyebab keruntuhan timbunan tidak serta merta hanya penurunan karena daya dukung tanah lunak yang rendah tetapi ketidak-stabilan lereng ini berdampak pada kejadian longsor dengan bidang longsor terletak pada lereng timbunan sampai dengan menimpa seluruh lereng timbunan. Pada timbunan yang mengalami longsor dengan bidang longsor dalam, penanganannya perlu dilakukan dengan struktur konstruksi penahan. Struktur konstruksi seperti *sheet piles*, turap serta dinding penahan atau *Mechanically Stabilized Earth Wall* (MSE-Wall) sering dilakukan.

Dengan latar belakang ketidak-stabilan lereng yang mengalami longsor menggunakan timbunan yang lebih ringan dibandingkan dengan timbunan tanah (untuk mengurangi beban gaya pendorong) maka untuk menangani kasus longsoran timbunan ini dapat dikombinasikan dengan tiang. Penggunaan tiang ini agar berfungsi efektif sehingga dapat memperkuat gaya penahanan ditempatkan pada asumsi bidang runtuhnya yang dapat memberikan efek terhadap meningkatnya gaya momen penahan.

Bilamana longsoran berbentuk lingkaran dengan bidang longsor terletak relatif sangat dalam maka kombinasi antara timbunan ringan mortar busa dan tiang merupakan solusi yang memadai. Untuk itu seperti halnya yang terjadi pada keruntuhan Timbunan Oprit Jembatan Randu Merak, Kab. Probolinggo, Prov. Jawa Timur maka solusi kombinasi ini diterapkan.

Dari hasil implementasi penerapan metode kombinasi ini memberikan solusi yang sangat baik untuk meningkatkan stabilitas lereng terhadap longsoran yang terjadi karena diterapkan metode penanganan *sheet pile* yang pada prinsipnya adalah untuk meningkatkan gaya momen penahan tidak efektif karena bidang longsor letaknya relatif dalam.

Pemanfaatan timbunan ringan sebagai *backfill* pada penanganan longsor dengan tiang – deret (*soldier piles*) yang dihubungkan dengan kepala tiang (*pile-cap*) tersebut menunjukkan bahwa tidak terjadi pergerakan lateral pada tiang sehingga membuktikan tidak menambah tekanan tanah aktif karena gaya lateral pendorong serta potensi adanya kelolosan tanah diantara tiang (*squeezing*) dapat dikurangi.

KAJIAN PUSTAKA

Tanah Lunak (Lempung Kohesif) Dan Kemampuannya Mendukung Beban Timbunan

Pada tanah lunak yang umumnya berupa tanah lempung kohesif (*cohesive soils*) mempunyai karakteristik sangat kompresibel sehingga parameter kuat gesernya sangat rendah. Bilamana lapisan tanah lunak tersebut menerima beban yang melebihi kemampuan daya dukungnya maka akan mengalami penurunan.

Selain penurunan, timbunan tersebut juga akan mengalami ketidak-stabilan lereng atau mengalami longsoran dikarenakan gaya yang menyebabkan momen pendorong (diakibatkan oleh berat tanah yang meningkat terutama dalam kondisi jenuh dan adanya tambahan beban struktur konstruksi di atasnya) yang tidak mampu diimbangi oleh gaya momen penahannya (gaya reaksi dari kohesi tanah sepanjang bidang lemah pada lereng).

Material Ringan Mortar Busa (*Lightweight Embankment Fill Materials*)

Material ringan mortar busa ("*foamed mortar light weight materials*") adalah merupakan campuran komposisi air, semen, agregat halus dan bibit busa (*foam*) dengan perbandingan yang bervariasi tergantung dari target nilai kuat tekan yang akan dicapai. Material ringan mortar busa mempunyai nilai kepadatan (densitas, γ_t) lebih ringan dibandingkan dengan material timbunan biasa, yaitu berkisar antara $0,6 \text{ kN/m}^3 - 0,8 \text{ kN/m}^3$, sedangkan timbunan biasa dengan material pilihan mempunyai nilai densitas sebesar $1,8 \text{ kN/m}^3$ dengan nilai kuat tekan melebihi timbunan tanah.

Kelebihan material ringan mortar busa ini selain mempunyai nilai densitas yang rendah juga implementasi penerapannya sama dengan beton pada umumnya yaitu tanpa adanya proses pemadatan atau mengeras sehingga sudah menjadikan memadat sendiri. Dengan terjadinya proses pengerasan maka kuat tekannya akan meningkat dan tidak terjadi tekanan tanah aktif atau penambahan beban lateral.

Material ringan mortar busa sebagai "*foamed mortar light weight materials*" mempunyai beberapa keunggulan dan kegunaan secara optimal, sebagai berikut (Febrijanto (2010) dan Iqbal (2012)) di karenakan beratnya ringan dan kekuatan cukup tinggi maka penggunaannya dapat direncanakan sesuai keinginan yaitu dengan menargetkan rencana berat isi dan kuat tekan tanahnya, sehingga penggunaannya dapat dilakukan berdasarkan ketentuan sebagai berikut:

1. Mengurangi berat timbunan bila diterapkan sebagai material timbunan dan memiliki daya dukung kekuatan yang memadai sehingga

dapat difungsikan sebagai lapisan tanah dasar (*subgrade*) fondasi perkerasan jalan.

- Mengurangi tekanan lateral tanah pada suatu struktur bangunan abutment fondasi jembatan, dikarenakan mengalami proses pengerasan maka hampir tidak ada tekanan lateral).

Berikut spesifikasi material ringan mortar busa yang disyaratkan dalam standard spesifikasi teknis (SNI 2012) sesuai dengan Tabel 1 dan Tabel 2 berikut, Indonesia Kemen. PU (2011).

Tabel 1. Kekuatan Tekan Minimum Mortar Busa Lapisan *Base*

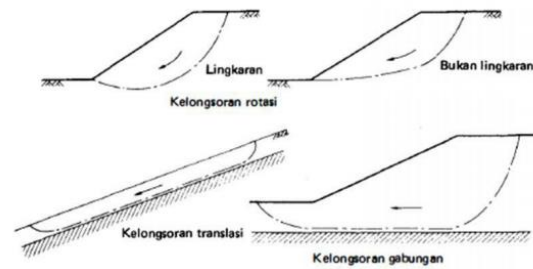
Umur Pemeraman (hari)	Kuat Tekan Min (UCS) (kPa)	Densitas Maks (kN/m ³)
14	2000	0,8

Tabel 2. Kekuatan Tekan Minimum Mortar Busa Lapisan *Sub Base atau subgrade*

Umur Pemeraman (hari)	Kuat Tekan Min (UCS) (kPa)	Densitas Maks (kN/m ³)
14	800	0,6

Stabilitas Lereng

Permasalahan stabilitas lereng perlu diperhatikan karena sering dihadapi sehubungan dengan ketentuan harus memenuhi persyaratan serta ketentuan standar alinyemen dan geometrik lainnya. Akibatnya, ruas jalan tersebut kemungkinan akan menghadapi kendala seperti melewati daerah yang secara geologi akan berdampak menurunnya tingkat stabilitas. Kasus lain yang terjadi karena harus memenuhi persyaratan tersebut, maka perlu dilakukan pekerjaan galian dan timbunan. Terdapat beberapa tipe keruntuhan lereng yang terjadi pada daerah pegunungan / perbukitan dengan mekanisme terjadi keruntuhannya mudah teridentifikasi karena berada pada bidang perlapisan dan sulit terdeteksi karena terjadi pada bidang perlemahan seperti diperlihatkan pada Gambar 1. (UII 2011)



Gambar 1. Mekanisme Keruntuhan Lereng

Propertis *engineering* tanah yang biasa digunakan untuk mengitung stabilitas lereng dan daya dukung tanah adalah nilai paramter kuat geser tanah yang terdiri dari: 1. sudut geser internal tanah satuannya derajat atau biasa dilambangkan dengan phi (ϕ) dan 2. kohesi atau lekatan tanah satuannya kPa (kN/m²) yang dilambangkan dengan c.

Distribusi Beban Terhadap Tekanan Lateral Tanah Pada Struktur Penahan Tiang-Rapat Atau Turap (*Sheet piles*)

Konsep tekanan tanah lateral dibagi menjadi tekanan tanah aktif dan tekanan tanah pasif dan sangat penting untuk perhitungan stabilitas lereng yang diperkuat dengan konstruksi penahan seperti turap atau *sheet piles* (turap), DPT (Dinding Penahan Tanah) dan MSE-Wall. Stabilitas lereng terpenuhi apabila perbandingan besarnya gaya yang membuat keruntuhan konstruksi tiang penahan atau *sheet piles* lebih kecil dari pada besarnya gaya penahannya. Terdapat 2 (dua) prinsip perhitungan tekanan tanah yaitu metode *Coulomb* dan *Rankine*. Teori Coulomb menganggap gesekan dinding dan sudut kemiringan termauk dalam persamaan untuk tekanan tanah konstan, konstruksi dinding penahan tanah adalah dinding miring dan permukaan kasar. Teori Rankine mengabaikan gesekan dinding, dan konstruksi dindingnya adalah dinding vertikal yang halus/licin.

Gaya yang dapat membuat keruntuhan adalah tekanan lateral tanah aktif yang dapat menyebabkan oleh sebab itu maka struktur turap atau *sheet piles* harus mempresentasikan suatu struktur konstruksi penahan sehingga tidak bergeser atau terguling. Bergesernya tiang-rapat

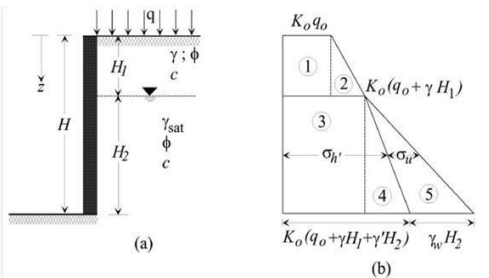
atau sheetpile, dan terlebih terguling karena beban gaya pendorong tersebut bekerjanya mempunyai eksentrisitas.

Pada stabilitas lereng timbunan oprit yang diperkuat dengan konstruksi penahan seperti diatas maka besarnya tekanan tanah aktif dipengaruhi oleh gaya horizontal akibat berat sendiri tanah timbunan dan beban struktur konstruksi seperti beban perkerasan jalan (beban mati) dan lalu-lintas kendaraan (beban hidup). Beban gaya tersebut akan mempengaruhi bertambahnya gaya lateral sebagai tekanan tanah aktif. Gaya horisontal selain tekanan tanah aktif dan pasif, terdapat juga tekanan tanah sebagai dampak akibat penurunan konsolidasi (Gambar 2 dan Gambar 3).

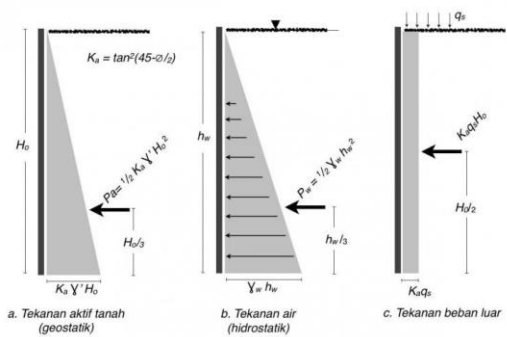
Distribusi beban lateral sebagai Tekanan Tanah Lateral (aktif dan pasif) yang bekerja pada suatu struktur konstruksi pada lereng (terhadap piles, *sheet piles* dan dinding penahan) diperlihatkan seperti pada gambar berikut ini (Gambar 2 untuk tiang bebas dan terjepit penuh dan Gambar 3 untuk tiang bebas dan terjepit penuh dengan variasi pembebanan yang bekerja).

Tekanan tanah aktif bekerja secara horisontal (lateral) yang mana besarnya dipengaruhi oleh besarnya densitas dan kedalaman tanah dikalikan dengan koefisien tekanan tanah aktif (K_a). Sedangkan tekanan tanah pasif juga bekerja secara horisontal tetapi memiliki arah yang berlawanan dengan tekanan tanah aktif. Besarnya tekanan tanah pasif didapatkan dengan mengalikan densitas, kedalaman tanah berupa koefisien tekanan tanah pasif (K_p).

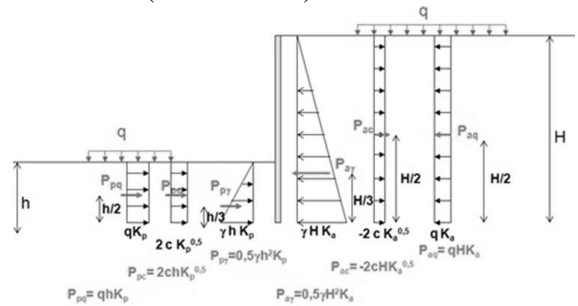
Selanjutnya menurut Rankine (1897), Tekanan Lateral Tanah Aktif (P_a) dan Tekanan Lateral Tanah Pasif (P_p), diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 2. Tekanan Tanah Aktif (Terzaghi 1960)



Gambar 3. Tekanan aktif dan pasif pada tiang (Rankine 1897)

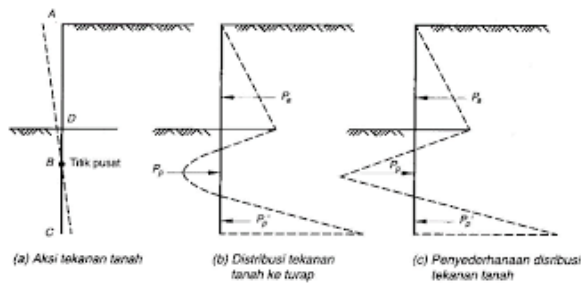


Gambar 4. Distribusi tekanan lateral tanah aktif dan tekanan lateral tanah pasif (Rankine, 1897 dan Hadijatmo 2010)

Deformasi Turap Akibat Distribusi Tekanan Lateral Tanah

Tekanan tanah lateral berbeda pada tiap jenis tanah. Demikian pula terdapat perbedaan yang cukup signifikan: tekanan lateral tanah tak berkohesi dan tekanan lateral tanah berkohesi.

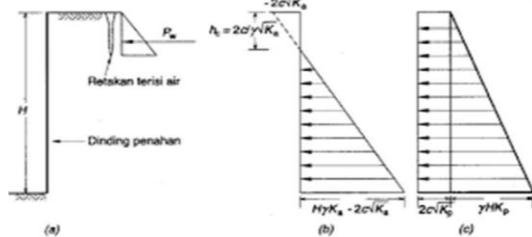
Distribusi beban tekanan tanah lateral (aktif dan pasif) pada turap (*sheet pile*) dijelaskan sebagai berikut untuk kondisi jenis tanah tertentu (Gambar 5). Untuk tanah kohesif tekanan tanah aktif dibelakang turap mengakibatkan turap bergerak ke kiri dan berputar pada titik pusat. Kondisi ini tekanan tanah pasif dibagian bawah titik putar akan terjepit dan mendorong tekanan tanah aktifnya. Tekanan tanah lateral pada titik pusat tersebut akan sama dengan nol karena mengalami tingkat penjuruan yang sama.



Gambar 5. Deformasi tiang akibat ketidak seimbangan tekanan tanah lateral pada *sheet pile*

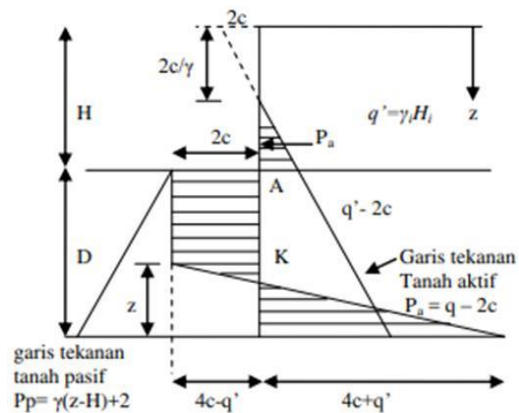
Kedalaman titik pusat dipengaruhi oleh nilai koefisien tekana lateral jenis tanah tanah (tanah kohesif atau tanah berbutir) yaitu K_a (koefisien tekanan lateral aktif) dan K_p (koefisien tekanan lateral pasif). Dampak adanya perputaran ini maka akan terjadi keruntuhan tanah dibagian atas (dibelakang *sheetpile*) seperti diperlihatkan pada Gambar 6 sebagai berikut:

1. Rekahan yang dipengaruhi oleh terdorongnya *sheet pile* bagian atas
2. Dimensi distribusi pembebanan yang bekerja pada *sheet pile* bagian atas
3. Distribusi beban yang bekerja yaitu beban hidup dan tekanan tanah aktif.



Gambar 6. Keruntuhan bagian atas akibat deformasi perputaran turap (*sheet piles*)

Dengan memperhatikan Gambar 6, maka distribusi tegangan pada turap di tanah lempung ditunjukkan pada Gambar 7. Terlihat bahwa deformasi yang terjadi sebesar $2c$ sepanjang $2c/\gamma t$, sehingga merupakan fungsi dari kohesi tanah dan berat isi tanah dibelakang turap merupakan pemindahan tekana tanah pasif yang berfungsi sebagai tekanan tanah aktif.



Gambar 7. Distribusi Tegangan Tanah pada *sheetpile* untuk tanah Kohesif (lempung)

Koefisien Tekanan Lateral Tanah

1. Tanah non-kohesif (*cohesionless soils*)

Untuk tanah non-kohesif (*cohesionless soils*), nilai koefisien tekanan tanah lateral kohesi dan non kohesif menurut Gouw (2009) secara umum mempunyai untuk tanah non kohesif (*cohesionless soils*) pada bidang datar diperlihatkan pada Gambar 8.

$$K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \frac{1 - \sin 30}{1 + \sin 30} = \frac{1}{3}$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} = \frac{1 + \sin 30}{1 - \sin 30} = 3$$

Rasio Umum Koefisien Tekanan Lateral	
Tanah Non Kohesif	Tanah Kohesif
K_a 0,22 - 0,33	K_p 1 - 2
K_0 0,4 - 0,6	K_0 0,4 - 0,8
K_p 3 - 14	K_a 0,5 - 1,0

(* Sumber: Gouw, 2009)

Gambar 8. Nilai Koeffiseien tekana lateral tanah untuk tanah non-kohesif (*cohesionless soils*)

2. Tanah Kohesif (*cohesive soils*)

Untuk tanah kohesif (*cohesive soils*), koefisien tekanan lateral tanah pada bidang datar dapat disederhanakan menjadi:

$$K_a = \text{tg}^2 (45^\circ - \phi/2)$$

$$K_p = \text{tg}^2 (45^\circ + \phi/2)$$

Untuk, misal kondisi jenuh untuk tanah lempung yang sangat kompresibel maka ϕ dapat dianggap nol, sehingga $K_a = K_p$.

Dengan demikian maka tekanan tanah aktif didepan turap (Gambar 7):

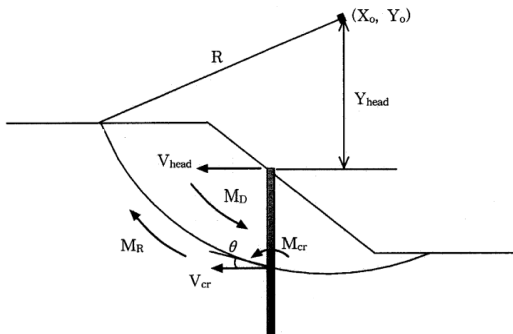
$$P_p = \gamma(z - H) + 2c \text{ untuk } z > H$$

Tekanan tanah aktif dibelakang turap menjadi berat isi tanah dikalikan kohesinya dikurangi 2 kali kohesinya untuk $Z < H$, lihat Gambar 7:

$$P_p = \gamma z - 2c$$

Deformasi Akibat Tekanan Lateral Aktif Terhadap Struktur Penahan Tiang-Rapat Atau Sheetpile

Dari kajian literatur diketahui bahwa keruntuhan timbunan yang berdampak longsor dapat berupa longsor lereng dangkal dan lereng dalam. Faktor penyebab longsor dalam secara umum disebabkan karena menurut Donovan M dkk (2013), bilamana dilakukan penanganan dengan tiang untuk penanganan pada longsor lereng dalam, berbetuk rotasi, maka akan terjadi mekanisme keruntuhan seperti diperlihatkan pada Gambar 9.

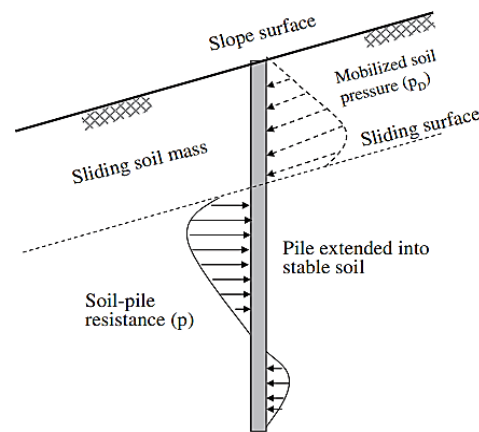


Gambar 9. Longsor rotasi dengan penanganan menggunakan tiang (Donovan M. et al 2013).

Selanjutnya tiang akan mengalami pembebanan lateral lebih dibagian atasnya seperti diperlihatkan pada Gambar 10 yaitu pergerakan tanah akibat beban berupa beban mati (berat sendiri dan beban struktur konstruksi di atasnya, misalnya perkerasan jalan) serta beban hidup (beban lalu-lintas).

Pada Gambar 10 diperlihatkan batas antara daerah tidak stabil (*sliding mass*) dan daerah yang stabil (*stable soils*). Daerah yang tidak stabil terjadi diatas bidang runtuh akan memberikan tekanan tanah aktif yang besarnya dipresentasikan sebagai tekanan tanah negatif yang bekerja dibelakang turap diatas bidang runtuh.

Tekanan tanah pasif ini akan berdampak pada terdefomasinya tiang dan bila bekerjanya membentuk gaya eksentrisitas maka tiang-rapat atau sheetpile akan terguling seperti diperlihatkan pada Gambar 5, 6 dan 7.



Gambar 10. Deformasi Tiang (turap) dibagian atas bidang runtuh akibat tekanan tanah aktif yang bekerja (Donovan M, dkk 2013)

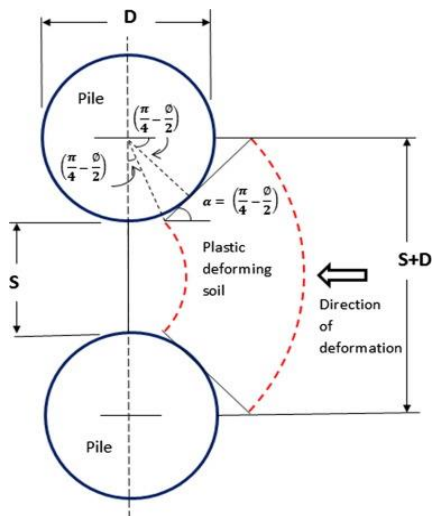
Dengan memperhatikan Gambar 9 dan 7, selanjutnya Donovan M, dkk (2013) menyatakan bahwa nampak akan sangat beresiko bilamana digunakan penahan menerus seperti turap karena distribusi aliran air bawah permukaan tidak terdisipasi sehingga mengakibatkan naiknya tegangan air pori. Keadaan ini akan berdampak turap akan mengalami deformasi pada bagian atasnya seperti diperlihatkan pada Gambar 5, 6 dan 7.

Deformasi akibat Beban Lengkung (*Effect Arching Load*) pada Struktur Penahan Tiang-Berjarak

Pada struktur penahan longsor dengan menggunakan tiang berjarak tertentu dimaksudkan sebagai solusi agar tidak terjadi

kenaikan tegangan air pori berlebih tetapi akan berdampak pada terjadinya lolosan tanah (*squeezing soils*) yang turut terbawa oleh aliran tanah (terutama dampak pada tanah jenuh).

Pengaruh adanya beban lengkung tanah (*arching effects*) menurut Chen C.Y (2002), beban pada tiang mengalami peningkatan. Selanjutnya Yi He, dkk (2015) menyatakan daerah arching effect merupakan terjadinya tanah lolos (*squeezing*) karena dapat sebagai daerah plasis atau terjadi deformasi plastis dan diperlihatkan pada Gambar 11.

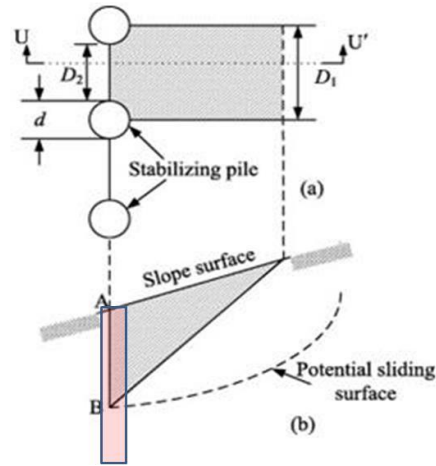


Gambar 11. Arching Effect (Yi He et al. 2015)

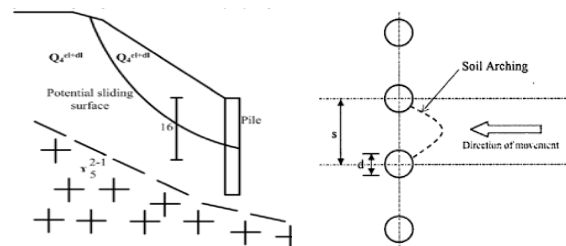
Kondisi ini senada dengan Jeong, S. Kim (2003), yang sebelumnya menyatakan penerapan stabilizing pile adalah sebagai metode yang memperhitungkan adanya beban lengkung tanah (*arching effect*) dan efek lolosnya tanah diantara tiang (*squeezing*). Selanjutnya untuk mengantisipasi hal ini maka Jeong, S. Kim (2003), menganjurkan jarak antara tiang perlu diperhitungkan terhadap kedalaman bidang longsor dan jarak antar tiang, diperlihatkan pada Gambar 12.

Demikian juga terhadap kedalaman deformasi tiang-berjarak yang menerima efek beban lengkung tanah (*arching effect*) dapat diketahui. Kedalaman tiang yang mengalami deformasi ditunjukkan sampai kedalaman pengaruh arching effect tiang dan menurut Yi He, dkk (2015) terjadi dibagian atas sampai batas terjadinya

bidang longsohnya yang mekanisme terbentuknya diperlihatkan pada Gambar 13.



Gambar 12. Stabilizing Piles sebagai metode penanganan lereng (Jeong 2003)



Gambar 13. Effect Arching (Yi, dkk, 2015)

Penanggulangan Longsoran Timbunan

Secara garis besar, metode penanganan longsoran atau peningkatan stabilitas lereng dapat dilakukan dengan prinsip-prinsip sebagai berikut:

1. Pengurangan beban pada lereng bagian atas atau pada timbunan oprit dilakukan menggunakan material ringan (Febrijanto, 2010) agar gaya tekanan tanah aktif berkurang.
2. Pemasangan perkuatan pada kaki lereng atau bagian lereng dengan struktur konstruksi seperti memasang perkuatan yang disesuaikan dengan mekanisme keruntuhannya
 - a. Keruntuhan lereng dangkal, maka perlu perkuatan dengan penyesuaian sudut dan ketinggian lereng atau dengan penambahan struktur konstruksi berupa sistem penulangan tarik (*reinforcement*)

- b. Keruntuhan lereng dalam, maka perlu perkuatan dengan struktur konstruksi seperti turap, *sheet piles* dan beban kontra.
3. Pengendalian aliran air (permukaan dan bawah permukaan) sehingga tidak terjadi penurunan nilai kuat geser atau daya dukung akibat naiknya tegangan air pori akibat tekanan air meningkat.

Salah satu metoda teknik penanganan dengan penggunaan material ringan berupa teknologi mortar-busa yang telah dikaji dan pengembangannya telah diterapkan sebagai advis teknik oleh Pusjatan-Kementerian PUPR dalam mengatasi permasalahan daya dukung dan penurunan.

HIPOTESA

Penggantian material pengisi (*backfill*) dengan mortar busa (*foamed mortar*) sebagai timbunan ringan (*lightweight embankment*) dapat memperkecil tekanan aktif lateral tanah pada penanganan longsoran timbunan dengan tiang akan mengurangi terjadinya deformasi tiang-rapat sehingga tekanan tanah aktif berkurang, atau lebih kecil dari tekanan tanah pasifnya ($P_a \leq P_p$).

METODOLOGI

Pemanfaatan timbunan ringan mortar busa (*foamed concrete light weight materials*) digunakan untuk mengatasi permasalahan ketidak-stabilan timbunan yang berada diatas tanah lunak terhadap permasalahan longsoran dalam.

Terjadinya longsoran dalam, diakibatkan beban timbunan melebihi daya dukung dan kekuatan geser tanah pendukungnya. metodologi yang dilakukan untuk membuktikan hipotesa adalah dengan mempelajari kajian literatur terhadap hal-hal berikut sesuai dengan kajian pustaka:

1. Mempelajari kajian pustaka terhadap hal-hal sebagai berikut:
 - a. Timbunan yang berada diatas tanah lunak
 - b. Keruntuhan timbunan karena menurunnya tingkat stabilitasnya
 - c. Keruntuhan timbunan terhadap penurunan berlebih terjadi karena daya dukung tanah

- lunak (lempung) dengan nilai konsistensi lunak dan nilai kompresibilitas besar.
 - d. Keruntuhan timbunan terhadap longsoran lereng dengan yang dicirikan adanya bidang runtuhnya dalam
 - e. Terjadinya peningkatan tekanan tanah aktif yang jauh melebihi tekanan tanah pasifnya.
2. Melakukan evaluasi dan pengamatan terhadap mode keruntuhan yang terjadi dilapangan dengan memperhatikan kondisi lapangan.
 3. Mengevaluasi dan menganalisis distribusi beban yang bekerja terhadap keseimbangan tekanan tanah aktif dan tekanan tanah pasif.
 4. Menganalisis stabilitas lereng timbunan terhadap longsoran yang terjadi terutama terhadap letak bidang longsoranya berdasarkan hasil pengamatan dilapangan.
 5. Menentukan dan mengevaluasi beberapa metode dan tipe jenis penanganan yang memadai dengan memperhatikan beberapa hal:
 - a. Bidang longsor yang terjadi dengan mengamati dan mencermati serta menganalisis longsoran
 - b. Mengevaluasi stabilitas lereng terhadap mekanisme longsoran
 - c. Menganalisis stabilitas lereng timbunan dengan memperhatikan hasil dari kajian literatur terhadap mode keruntuhan dan penanganan yang sesuai.
 6. Melakukan pembahasan terhadap metode penanganan yang paling efektif terhadap permasalahan yang terjadi:
 - a. Keseimbangan gaya yang menjadikan momen pendorong lebih besar dari momen penahanya.
 - b. Keseimbangan bekerjanya gaya lateral tanah akibat tegangan tanah aktif lebih besar dari tegangan lateral tanah tanah pasifnya.
 7. Menganalisis stabilitas lereng timbunan dengan menerapkan penanggulangan menggunakan turap atau *sheetpile* dan menggunakan tiang-deret berjarak serut dibagian atasnya dihubungkan dengan *sheet piles*.
 8. Menganalisis stabilitas lereng timbunan ringan dengan kombinasi tiang sebagai solusi

efektif kombinasikan dengan timbunan ringan mortar busa.

HASIL DAN ANALISIS

Pengamatan terhadap kondisi lapangan telah terjadi Longsoran Timbunan Oprit Jembatan Randu Merak di Probolinggo. Jembatan Randu Merak yang telah berusia puluhan tahun menghubungkan kota Banyuwangi - Paiton direncanakan ada peremajaan jembatan baru pada tahun 2015 setelah beberapa kali mengalami longsoran pada timbunan opritnya.

Keruntuhan Timbunan Oprit

Berdasarkan hasil pengamatan kondisi dilapangan, longsoran pada oprit timbunan ini diakibatkan oleh adanya pergerakan tanah dasar yang diduga karena adanya gerusan air di bagian bawah pilar jembatan (Gambar 14).



Gambar 14. Lokasi Longsoran

Pada Gambar 14 tersebut nampak adanya longsoran lereng timbunan yang disebabkan karena adanya penjuhan kaki lereng. Penanganan dengan turap (*sheet pile*) menunjukkan gejala pergerakan pada bagian atasnya dan diperlihatkan pada Gambar 15.



Gambar 15. Penanganan dengan turap (*sheetpile*) menunjukkan gejala keruntuhan timbunan bagian atasnya sehingga turap mulai terdeformasi.

Prinsip Penanganan dengan Turap

Penanganan keruntuhan timbunan oprit berdasarkan kajian literatur yang menunjukkan adanya:

1. Deformasi Tiang akibat ketidak-seimbangan Tekanan Tanah Lateral pada turap (*sheetpile*) diperlihatkan pada Gambar 2, 3 4, 5, 6 dan 7. Distribusi Tekanan Lateral Tanah Aktif dan Tekanan Lateral Tanah Pasif (Rankin, 1897; Terzaghi, 1960 dan Hadijatmo, 2010).
2. Pengaruh ketidak-stabilan timbunan oprit stabilitas yang mengalami keruntuhan lereng dalam (*deep slide*) akibat momen pendorong $>$ dari momen penahannya. Longsoran Rotasi dengan penanganan menggunakan tiang, Gambar 9 dan 10 (Donovan M, dkk, 2013).
3. Deformasi Tiang (turap) dibagian atas bidang runtuh akibat tekanan tanah aktif yang bekerja merupakan implementasi pengaruh tekanan pasif sehingga dapat mengakibatkan turap (*sheet pile*) terdeformasi, Donovan M, dkk (2013).
4. Pengaruh adanya beban lengkung tanah (*arching effects*) menurut Chen C.Y (2002), beban pada tiang mengalami peningkatan. Selanjutnya Yi He, dkk (2015) menyatakan daerah *arching effect* merupakan terjadinya tanah lolos (*squeezing*) karena dapat sebagai daerah plasis atau terjadi deformasi plastis dan diperlihatkan pada Gambar 11.
5. S. Kim (2003), menganjurkan *stabilizing pile* dengan mempertimbangkan jarak antara tiang yang diperhitungkan terhadap kedalaman

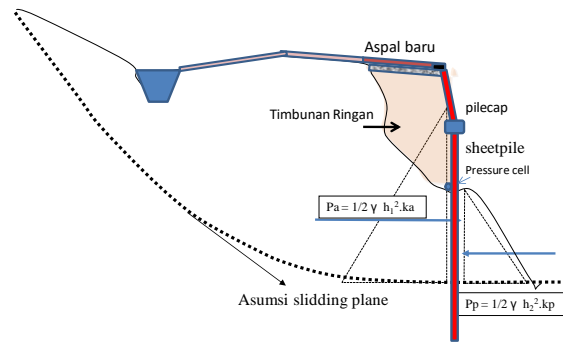
bidang longsor dan jarak antar tiang, diperlihatkan pada Gambar 12.

- Menurut Yi He, dkk (2015) pengaruh terhadap kedalaman *arching effect* pada tiang terjadi dibagian atas sampai batas terjadinya bidang longornya yang mekanisme terbentuknya diperlihatkan pada Gambar 13.

Prinsip Penanganan Dengan Timbunan Ringan Mortar Busa

Dengan memperhatikan butir-butir prinsip diatas, maka penanggulangan longoran dalam (*deep slide*) yang terjadi pada timbunan oprit jembatan Randu Merak, Probolinggo, dilakukan dengan kombinasi antara turap dengan timbunan ringan mortar busa. Fungsi mortar busa sebagai *backfill* agar tekanan lateral aktif berkurang. Untuk memberikan gambaran agar diperoleh cakupan yang dibahas maka sketsa penanganan diperlihatkan pada Gambar 16. Sketsa penanganan pada Gambar 16 ini merupakan kombinasi penanganan antara turap dan timbunan ringan material busa yang fungsinya adalah sebagai berikut:

- Tambahan beban tekanan lateral tanah aktif yang ditimbulkan oleh tekanan tanah pasif dibelakang turap (*sheet pile*) perlu diantisipasi agar turap (*sheet pile*) tidak terdeformasi dibagian atasnya,
- Turap (*sheet pile*) difungsikan sebagai penahan longoran secara keseluruhan dan dipapcang sampai kedalaman tanah keras (SPT>30), sedalam 16 meter yang daukur dari eksisting permukaan jalan.
- Timbunan ringan ditempatkan sebagai timbunan pengisi (*backfill*) dibelakang turap sehingga diharapkan pertambahan baban lateral yang diakibatkan oleh bertambahnya tekanan tanh aktif sebagai dampak tekanan tanah pasif yang timbul akan berkurang, diperlihatkan pada Gambar 16.



Dimana:

- Pa = tekanan tanah aktif
- Pp = tekanan tanah pasif
- C1 dan C2 = *pressures Cell*
- $\gamma_t = 18 \text{ kN/m}^3$, berat isi tanah asli (kN/m^3)
- $\gamma_m = 8 \text{ kN/m}^3$, berat isi mortar beton (kN/m^3)
- Ka dan Kp = koefisien tekanan tanah

Gambar 16. Sketsa Prinsip Penanggulangan longoran

Timbunan Menggunakan Material Pilihan

Nilai tekanan lateral yang dihitung adalah nilai tekanan tanah aktif dan tekanan akibat konsolidasi dengan menggunakan teori Rangkine sebagai berikut:

$$\sigma = h \gamma K_a + q K_0$$

$$K_a = \text{tg}^2 (45 - \phi/2)$$

$$K_0 = 0,95 - \sin \phi$$

dimana:

- σ = tekanan lateral (kPa)
- h = kedalaman titik yang ditinjau (m)
- γ = densitas (kN/m^3)
- K_a = koefisien tanah aktif
- K_0 = koefisien tekanan lateral akibat konsolidasi
- ϕ = sudut geser dalam ($^\circ$)
- q = beban kendaraan (kPa)

Paramater tanah yang digunakan adalah sebagai berikut:

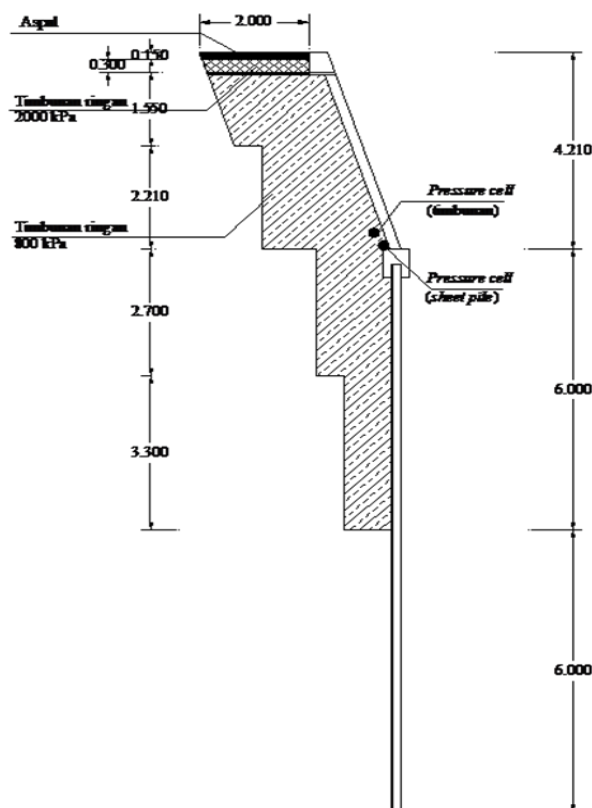
Tabel 3. Parameter Tanah Timbunan yang Digunakan

Paramater	Simbol	Nilai
Densitas	γ	18 kN/m^3
Sudut geser dalam	ϕ	32 $^\circ$
Kohesi	C_u	37 kPa

Penanganan Longsor Oprit Randu Merak Probolinggo

Dengan mempertimbangkan hasil analisis stabilitas lereng maka penanganan dengan struktur konstruksi turap dan beban timbunan pengisi menggunakan timbunan ringan mortar busa. Kombinasi antara material timbunan ringan mortar-busa dengan turap (*sheet pile*) telah direncanakan sedemikian rupa agar pekerjaan pelaksanaannya dapat dilakukan dengan baik dan diperlihatkan pada Gambar 17.

. Hasil analisis tekanan lateral bila timbunan biasa diterapkan berdasarkan analisis perhitungan terhadap tekanan tanah aktif lateral dan vetikal; tekanan lateral pada turap = 29,58 kPa dan tekanan lateral pada dasar timbunan = 28,48 kPa.



Gambar 17. Penempatan *pressure cell* pada oprit

Pressure Cell Pengukur Deformasi

Selanjutnya untuk mengetahui dan memantau deformasi turap (*sheet pile*) dipasang 2

(dua) buah instrumentasi *pressure cell* yang ditempatkan pada timbunan dan pemasangannya diperlihatkan pada Gambar 18. *Perssure cell* ini dimaksudkan:

1. Untuk mengetahui deformasi vertikal, bekerjanya timbunan ringan pada tanah asli (tanah dasar).
2. Untuk mengetahui deformasi lateral bekerjanya timbunan ringan pada turap (*sheet pile*).

Untuk mengetahui efektifitas penerapan timbunan ringan dilakukan dengan mengevaluasi pembacaan *pressure cell* dan hasilnya diperoleh dengan membandingkan nilai tekanan lateral yang dihasilkan antara timbunan tanah menggunakan material pilihan dan timbunan ringan menggunakan mortar-busa.



Gambar 18. *Pressure cell* pada timbunan untuk mengukur defromasi: vertikal timbunan pada tanah dasar dan lateral pada *Sheet Pile*

PEMBAHASAN

Secara prinsip pembahasan difokuskan pada permasalahan tekanan lateral yang bekerja pada turap (*sheetpile*) berdasarkan adanya tambahan tekanan tanah aktif.

Tekanan Tanah Pasif Yang Bekerja Dibelakang Turap (*Sheet pile*)

Dengan memperhatikan hasil dari kajian literatur maka terjadinya mekanisme keruntuahn bagian atas tiang ini disebabkan karena pertambahan tekanan tanah aktif yang berfungsi sebagai tekanan lateral tanah aktif tambahan sebesar:

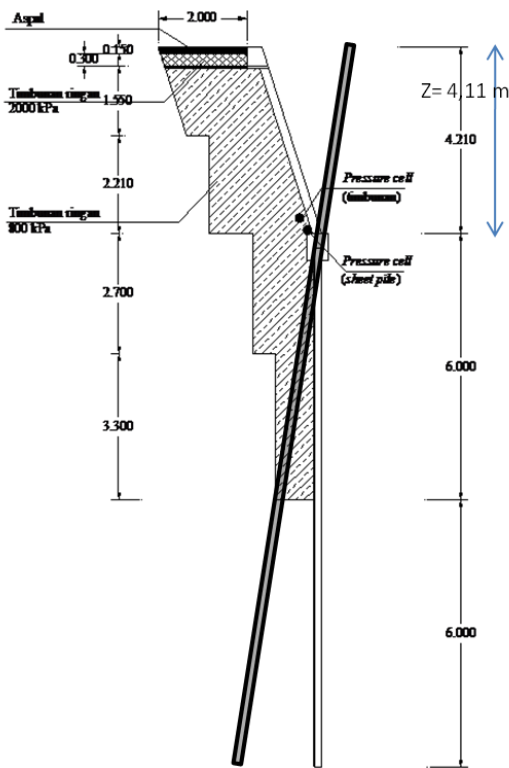
Untuk $Z > H$ $P_p = \gamma(z - H) + 2c$

Untuk $Z < H$ $P_p = \gamma z - 2c$

Penentuan Kedalaman Bidang Batas Tekanan Tanah Aktif Dan Pasif

Bila dihitung maka tekanan tanah aktif yang berasal dari meningkatnya tekanan tanah pasif ini. Distribusi tekanan tanah aktif tambahan ini secara prinsip diperlihatkan pada Gambar 7. Untuk mengetahui terjadinya deformasi akibat tekanan laterla aktif tambahan dilakukan analisis terhadap posisi z yang merupakan bidang batas deformasi lateral dengan menggunakan data tanah yang diperoleh dilapangan.

Selanjutnya diperoleh : $Z=2c/\gamma= 2 \times 37/18 = 4,11$ m hal ini menunjukkan bahwa bilamana timbunan biasa digunakan sebagai timbunan pengisi (*backfill*) maka akan terjadi tekanan tanah lateral aktif tambahan yang bekerja pada turap (*sheetpile*) dan akan terdeformasi lateral seperti diperlihatkan pada Gambar 18.



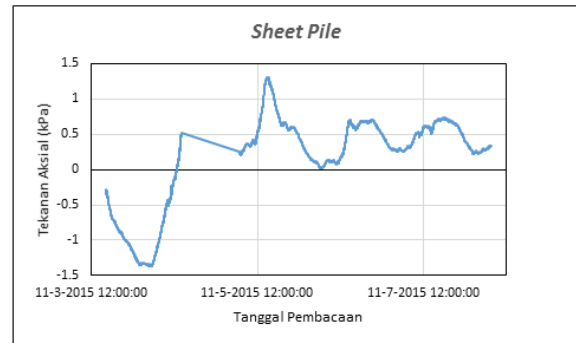
Gambar 19. Posisi terjadinya deformasi $z = 4,11$ m dari level ketinggian dengan timbunan biasa

Timbunan Menggunakan Material Ringan Mortar Busa (*Foamed Mortar Lightweight Concrete*)

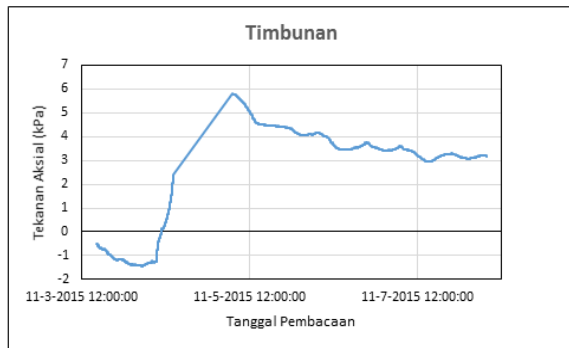
Diharapkan dengan timbunan ringan sebagai *backfill* maka tidak terjadi tekanan tanah lateral aktif tambahan sehingga turap tidak terdeformasi.

Tekanan lateral akibat timbunan ringan mortar busa dilakukan dengan melakukan pembacaan *pressure cell* terpasang (Gambar 18). *Pressure cell* tersebut dipasang pada dasar timbunan yang berdekatan dengan kepala tiang Turap, yaitu pada kedalaman 4,01 m dan pada *sheet pile* yaitu pada kedalaman 4,21 m dari permukaan. Posisi dari penempatan *pressure cell* diperlihatkan pada Gambar 18, dan hasil pembacaan disajikan berikut ini:

1. Pembacaan *pressure cell* dilakukan pada tanggal 3 – 8 November 2015 setiap 5 detik.
2. Hasil pembacaannya besarnya tekanan lateral akibat timbunan ringan berdasarkan pembacaan *pressure cell* pada *sheet pile* dan dasar timbunan dalam bentuk grafik
3. Hasil pembacaan ditunjukkan pada Gambar 20 dan Gambar 21 dengan trend setelah optimum dicapai selanjutnya terjadi grafik yang monoton /asimptotis.



Gambar 20. Grafik tekanan lateral pada *sheet pile* akibat timbunan ringan



Gambar 21. Grafik tekanan lateral pada dasar timbunan akibat timbunan ringan

Berdasarkan Gambar 20 dan Gambar 21, terlihat bahwa nilai tekanan maksimum yang terjadi akibat timbunan ringan pada *sheet pile* yaitu sebesar 1,37 kPa. Sedangkan nilai tekanan maksimum yang terjadi akibat timbunan ringan pada dasar timbunan lebih besar daripada tekanan pada *sheet pile* yaitu sebesar 5,79 kPa.

Sedangkan untuk nilai tekanan lateral akibat timbunan tanah diperhitungkan dari besarnya tekanan aktif ditambah tekanan akibat konsolidasi. Perbandingan besarnya tekanan lateral akibat timbunan tanah dan timbunan ringan ditunjukkan pada Tabel 4 berikut ini.

Tabel 4. Perbandingan Penggunaan Timbunan Tanah dan Timbunan Ringan

Posisi <i>pressure cell</i>	Tekanan lateral akibat timbunan tanah (kPa), berdasarkan perhitungan (a)	Tekanan lateral maksimal timbunan ringan (kPa), berdasarkan instrumentasi (b)	Persentase reduksi (d)= (a-b) (c)=(d)/(a)x100% maka: (c) =100% - (d) (c) (%)
<i>Sheet pile</i>	29,58	1,37	95,36
timbunan	28,48	5,79	80,00

Berdasarkan hasil pada Tabel 4, timbunan ringan dapat mewujudkan pengurangan tekanan mencapai sebesar 95,36% dibandingkan dengan menggunakan timbunan tanah. Sedangkan tekanan vertikal pada timbunan ringan mencapai reduksi tekanan hampir mencapai 80,00 % dikarenakan berat gravitasi masih mempengaruhinya.

Penggunaan timbunan ringan mortar-busa terbukti dapat mereduksi besarnya tekanan lateral. Berdasarkan kajian pada oprit Jembatan Randu Merak, Probolinggo ini, besarnya tekanan lateral yang menyebabkan terdeformasi turap dapat direduksi 95,36% dan tekanan vertikal mencapai hampir 80.00 %.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Kombinasi turap (*Sheet pile*) dan timbunan ringan mortar-busa (*Lightweight Mortar Embankment Fill*) dapat digunakan sebagai salah satu penanganan stabilitas timbunan tinggi pada tanah lunak yang mengalami deformasi akibat gaya tekanan tanah lateral aktif. *Sheet pile* sebagai penanganan terjadinya longsor dalam sedangkan timbunan ringan sebagai

Berdasarkan hasil pemantauan terhadap instrumen *pressure cell*, maka bila dibandingkan dengan material timbunan pilihan, timbunan ringan mortar-busa dapat mereduksi nilai tekanan lateral sebesar 95,36 % dan tekanan vertikal sebesar hampir 80,00%.

Dengan reduksi tekanan lateral tanah aktif maka akan dapat mengatasi terjadinya deformasi struktur konstruksi penanggulangan yang ada, dalam hal ini mengatasi potensi terjadinya deformasi turap (*sheet pile*).

Saran

Pemanfaatan timbunan ringan sangat efektif untuk mengurangi beban yang dapat menyebabkan terjadinya ketidak-stabilan struktur konstruksi yang berpotensi mengalami deformasi baik aksial maupun lateral serta penurunan berlebih. Timbunan ringan dapat dicoba untuk digunakan sebagai salahsatu alternatif solusi penanganan longsor yang diakibatkan meningkatnya beban gaya dorong berlebih baik sebagai beban maupun kombinasi dengan struktur konstruksi penanganan yang ada.

UCAPAN TERIMA KASIH

Sebagai wujud penghargaan terhadap pihak-pihak yang terlibat dalam penyusunan jurnal ini, kepada Bapak Direktur Bina Teknik Jalan dan Jembatan, Direktorat Jendral Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, tim lapangan serta yang terlibat dan tim Editor Jurnal.

DAFTAR PUSTAKA

- Ashour, M., Ardalan, H. 2012. Analysis of pile stabilized slopes based on soil-pile interaction. *Comput. Geotech.* 39, 85–97.
- Chen, C.Y. and G.R. Martin. 2002. Soil-structure interaction for landslide stabilizing piles, *Computers and Geotechnics*, 29(5): 363-386.
- Dengfeng, Li, X. Hu and Victor Maicolo Nhansumba . 2017. Study of Vertical Variation Regularity of Horizontal Soil Arching Height Along Pile Length. *Geology Science and Research*.
- Donovan, M., Fauziah A., Hemanta H., and Naoto W. 2013. The Design Method of Slope Stabilizing Piles. *International Journal of Current Engineering and Technology*.
- Febrijanto, R. 2008. Laporan Akhir Penyusunan DED Uji Coba Skala Penuh Timbunan Badan Jalan Dengan Material Ringan. Laporan Penelitian Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan. Departemen Pekerjaan Umum.
- Febrijanto, R. 2009. Laporan Akhir Kajian Dan Pengawasan Uji Coba Skala Penuh Timbunan Badan Jalan Dengan Material Ringan. Laporan Penelitian Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan. Departemen Pekerjaan Umum.
- Gong, W., Huang, H., Juang, C.H., Wang, L. 2017. Simplified-robust geotechnical design of soldier pile-anchor tieback shoring system for deep excavation. *Marine Georesource & Geotechnologu* 35(2): 157–169.
- Indonesia, Departemen Pekerjaan Umum. 2006. Panduan Geoteknik Jalan. Edisi II. Japan
- Indonesia, Kementerian Pekerjaan Umum. 2011. Konsensus R0 Pedoman Perencanaan Timbunan Jalandengan Menggunakan Material Ringan Beton Busa. Kementerian Pekerjaan Umum. 2011.
- Iqbal, M. 2012. Kajian Penanganan Tanah Lunak Dengan Timbunan Jalan Mortar Busa. Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan: Bandung
- Irawan, F. 2011. Masalah Galian Basement Dan Solusinya Pada Suatu Proyek di Medan, Posted on July 28, 2011
- Juang, C.H., Wang, L., Hsieh, H.S., Atamturktur, S. 2014. Robust geotechnical design of braced excavations in clays. *Structural. Safety* 49: 37–44.
- Kourkoulis, R., Gelagoti, F., Anastasopoulos, I., Gazetas, G. 2010. Slope stabilizing piles and pile-groups: parametric study and design insights. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 137(7): 663–677.
- Poulos, H.G.: Design of reinforcing piles to increase slope stability. *Canadian Geotechnical Journal* 32(5), 808–818 (1995)
- Universitas Islam Indonesia – UII (2011): Landasan Teori tentang Stabilitas Lereng dan penanganannya, <https://dspace.uui.ac.id/bitstream/handle/123456789/7863/05.3.BAB%20III%20%20.pdf?sequence=7&isAllowed=y>
- Jeong, S. Kim, B. Won, J. and Lee, J. 2003. Uncoupled Analysis of Stabilizing Piles in Weathered Slopes. *Computers and Geotechnics*, 30(8): 671-682.
- Yi He, Hemanta Hazarika, Noriyuki Yasufuku, and Zheng Han. 2015. Evaluating the effect of slope angle on the distribution of the soil-pile pressure acting on stabilizing piles in sandy slopes. *Computers and Geotechnics* 69: 153-165.