

Analisis Penurunan dan Lendutan Sistem Pondasi Tiang Sebagai Perkuatan pada Tanah Gambut

Dermina Roni Santika Damanik*, Novdin Manoktong Sianturi, Deardo Samuel Saragih, Virgo Erlando Purba

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Simalungun,
Jl. Sisingamangaraja Barat, Bah Kabul, Siantar Sitalasari, Kota Pematang Siantar, 21142

Abstrak

Salah satu metode perbaikan tanah gambut adalah metode *preloading* menggunakan timbunan. Daya dukung tanah gambut yang rendah dapat diantisipasi dengan perkuatan. Model timbunan dibuat dari potongan besi yang diberikan secara bertahap, sedangkan perkuatan dibuat dari grid bambu dengan kombinasi tiang. Model uji di laboratorium menggunakan bak uji berukuran 120 cm x 90 cm x 90 cm. Melalui uji model didapatkan data-data penurunan di tengah timbunan dan lendutan pada arah melintang timbunan. Simulasi numeris dengan *Plaxis 2D* digunakan untuk menganalisis penurunan dan lendutan akibat timbunan di atas tanah gambut yang diperkuat dengan sistem tiang. Hasil analisis dengan *plaxis 2D* didapatkan bahwa penurunan akibat beban timbunan dan lendutan sistem perkuatan mendekati sama hasil pengamatan di laboratorium, terutama pada tiang-tiang yang lebih panjang. Pola penurunan dan lendutan hasil simulasi numeris lebih baik dibandingkan dengan data pengamatan. Dengan demikian, analisis penurunan dan lendutan akibat beban timbunan di atas tanah gambut dapat disimulasi secara numeris menggunakan *plaxis 2D*.

Kata kunci: gambut, tiang pancang, penurunan, lendutan, *plaxis 2D*.

Abstract

One method of peat soil improvement is the *preloading* method using embankment. The low bearing capacity of peat soil can be anticipated by reinforcement. The embankment model is made from pieces of iron that are given in stages, while the reinforcement is made from a bamboo grid with a combination of piles. The test model in the laboratory uses a test box measuring 120 cm x 90 cm x 90 cm. Through the model test, it is obtained data of settlement in the center of the embankment and deflection in the cross section of the embankment. Numerical simulations with *Plaxis 2D* were used to analyze settlement and deflection due to embankment on peat soil reinforced by piles system. The results of the *Plaxis 2D* analysis showed that the settlement due to the embankment load and the deflection of the reinforcement system was close to the results observed in the laboratory, especially on longer piles. The pattern of settlement and deflection of the numerical simulation results is better than the observational data. Thus, the analysis of settlement and deflection due to embankment loads on peat soil can be simulated numerically using *Plaxis 2D*.

Keywords: peat, pile, settlement, deflection, *plaxis 2D*.

1. Pendahuluan

Tanah mempunyai peranan yang sangat penting dalam pembangunan konstruksi sipil, karena tanah berfungsi sebagai penahan beban di atasnya. Tanah dengan daya dukung rendah dapat diperbaiki dengan

metode *preloading* berupa timbunan. Tanah gambut merupakan salah satu jenis tanah yang memiliki daya dukung rendah, kadar air yang tinggi, angka pori yang besar, dan *specific gravity* yang rendah (Yulianto dan Mochtar, 2010; Waruwu dkk., 2016).

Mochtar dkk. (2014), menyatakan bahwa selain daya dukung yang rendah, tanah gambut berserat juga memperlihatkan pemampatan yang besar dan penurunan tidak seragam. Daya dukung tanah gambut yang rendah

*) Penulis Korespondensi.

E-mail: derminaroni.damanik@gmail.com

akan menimbulkan masalah apabila dijadikan sebagai tanah dasar konstruksi sipil.

Beberapa perkuatan yang digunakan pada tanah lunak dan gambut di antaranya perkuatan bambu (Marto dan Othman, 2011; Waruwu dan Susanti, 2015; Hedge dan Sitharam, 2015; Maulana *dkk.*, 2018; dan Waruwu *dkk.*, 2018); Geogrid dan geotekstil (Sasaki *dkk.*, 2004; Meyer dan Shao, 2005; Rowe dan Li, 2005; dan Liu *dkk.*, 2007); pelat beton (Vakher, 2000); dan sistem pelat terpaku (Hardiyatmo 2011; Puri *dkk.*, 2017; dan Waruwu *dkk.*, 2017).

Perbaikan tanah gambut dengan *preloading* berupa timbunan dengan tebal lapisan tertentu telah diteliti oleh beberapa peneliti terdahulu (Porbaha *dkk.*, 2000; Meyer dan Shao, 2005; Susanti *dkk.*, 2017, Sianturi dan Saragih, 2020). Timbunan sebagai *preloading* dapat dilakukan dengan cara bertahap dan dalam waktu yang cukup lama. Timbunan yang dilakukan secara cepat dan tepat dapat mempengaruhi kestabilan timbunan. Penimbunan tanah gambut dapat mengalami penurunan yang signifikan akibat beban timbunan yang diberikan. Penurunan tersebut terjadi karena adanya deformasi partikel tanah, relokasi partikel, keluarnya air atau udara dari dalam pori, dan oleh penyebab lainnya.

Reduksi penurunan akibat beban timbunan dapat terjadi dengan penggunaan tiang-tiang secara terikat sebagai perkuatan pada tanah gambut. Saragih *dkk.* (2020) menyatakan bahwa penurunan pada sistem tiang dan pelat lebih kecil dibandingkan dengan tiang tidak terikat dengan pelat. Reduksi penurunan pada tiang terikat didapatkan sebesar 11,43-11,53 %. Konstruksi timbunan di atas tanah gambut lebih stabil, karena sistem perkuatan tiang terikat mampu meningkatkan kekakuan, modulus reaksi tanah, dan daya dukung tiang.

Waruwu dan Nasution (2020) menganalisis penurunan system perkuatan tiang beton dengan grid bambu. Hasil analisis penurunan tanah gambut menggunakan simulasi numeris dengan Plaxis 2D didapatkan bahwa penurunan dari analisis umumnya lebih besar dibandingkan data pengamatan, namun pola penurunan yang didapatkan mendekati sama dengan metode lainnya.

Simulasi numeris dengan Plaxis 2D terdiri dari dua model, masing-masing *plane strain* maupun *axi-simetri*. Timbunan di atas tanah lunak dapat dimodelkan dengan *plane strain* dan tiang pancang dapat dimodelkan dengan *axi-simetri* (Balasubramaniam *dkk.*, 2010; Kokasih, 2012). Waruwu *dkk.*, (2017) menyatakan bahwa penurunan akibat beban timbunan pada tanah yang diperkuat dengan tiang-tiang dapat dianalisis dengan model *plane strain*. Plaxis 2D dapat menghasilkan nilai lendutan dari perkuatan di bawah timbunan.

Stabilitas timbunan dipengaruhi oleh seberapa besar daya dukung tanah di bawahnya dan seberapa besar tinggi timbunan yang diberikan setiap tahapannya. Untuk mengetahui pengaruh penggunaan sistem perkuatan dan tahapan pembebanan yang diperlukan dalam mencapai stabilitas timbunan yang baik perlu perhitungan dan uji model sebagai validasi hasil analisis. Makalah ini memaparkan hasil simulasi numeris dengan plaxis 2D dan perbandingan hasil analisis dengan data pengamatan dari uji model di laboratorium.

Rancangan penelitian dilakukan dengan cara pengamatan model skala kecil di laboratorium yang dibebani secara merata dan bertahap. Hasil pengamatan penurunan dan lendutan dianalisis dengan Plaxis 2D dan membandingkan dengan data-data pengamatan dari uji model di laboraorium.

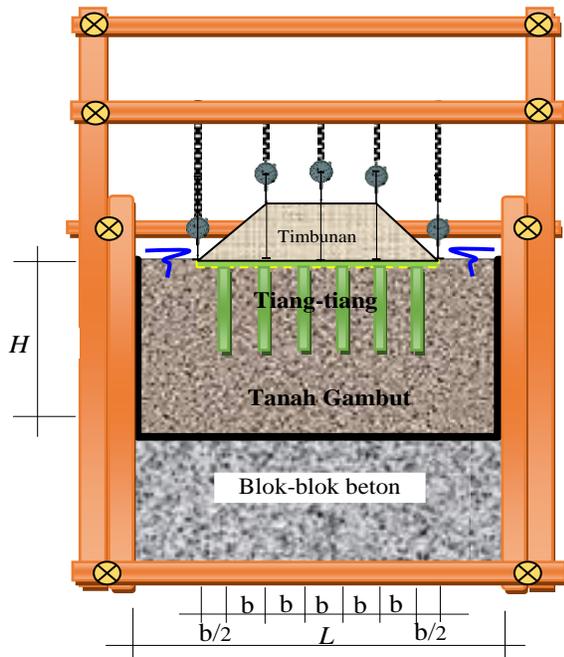
2. Metode dan Bahan

Pelaksanaan pengujian model timbunan pada tanah gambut yang diperkuat dengan sistem perkuatan dari tiang-tiang dan grid bambu. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Mekanika Tanah - Universitas Simalungun. Media tanah yang digunakan berupa tanah lunak dengan jenis tanah gambut yang diambil dari daerah Riau.

Pengamatan hasil uji berupa penurunan akibat timbunan dan lendutan sistem perkuatan didapatkan dari uji model dengan skala laboratorium (Gambar 1). Pemodelan terdiri dari tiang-tiang yang dipancang dalam gambut berdiameter 2 cm dengan panjang 10 cm, 25 cm dan 35 cm. Jarak tiang (*b*) disusun setiap 10 cm dan tiang satu dengan yang lainnya disatukan dengan grid bambu pada arah horizontal berukuran 60 cm x 30 cm.

Model diuji dalam bak berukuran pajang (*P*) 120 cm, lebar (*L*) 90 cm, dan tinggi (*T*) 90 cm. Tebal lapisan tanah gambut (*H*) 50 cm dan beban timbunan disusun dari urugan potongan besi dengan kemiringan 1:1. Muka air tanah rata dengan muka tanah. Pada bagian bawah bak uji diisi blok beton sehingga ketebalan sampel gambut sekitar 50 cm. Bagian dalam bak uji dilapisi terpal, agar media tanah tetap dalam kondisi tergenang air.

Beban timbunan ditambahkan setiap hari dengan tekanan sebesar 1,51 kPa, 3,02 kPa, 4,53 kPa, 6,05 kPa, dan 7,56 kPa. Adapun beban timbunan dimodelkan dari potongan besi dengan tebal 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm, dan 10 cm. Setiap tahapan beban dilakukan pembacaan penurunan menggunakan *dial gauge* yang dipasang setiap jarak 15 cm dengan jumlah 5 (lima) dial. Pembacaan *dial gauge* di tengah digunakan untuk menentukan penurunan di tengah timbunan dan pembacaan kelima *dial gauge* digunakan untuk mengukur lendutan pada arah melintang model pengujian.



Gambar 1. Penampang uji model di laboratorium

Data yang digunakan untuk diinput ke dalam software Plaxis 2D yaitu hasil pengujian dari laboratorium (Tabel 1). Selain data-data tanah gambut, bambu yang digunakan sebagai perkuatan perlu pengujian untuk mendapatkan nilai elastisitas.

Tabel 1. Sifat dan Karakteristik Tanah Gambut

| No. | Parameter | Nama | Nilai |
|-----|--|-------------|--------------|
| 1 | Model Material | Model | Mohr-Coulomb |
| 2 | Jenis perilaku material | Jenis | Drained |
| 3 | Berat isi tanah (kN/m ³) | γ | 10,75 |
| 4 | Permeabilitas arah vertikal dan horizontal (m/det) | $k_y = k_x$ | 0,879 |
| 5 | Kohesi (kPa) | c | 2,8 |
| 6 | Sudut gesek dalam | ϕ | 33,22° |
| 8 | Elastisitas (kN/m ²) | E_{ref} | 26,78 |

Hasil dari pengujian di laboratorium, diperoleh sifat-sifat material grid dan tiang bambu seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2 dan Tabel 3. Nilai modulus elastisitas grid dan tiang bambu didapatkan dengan menggunakan metode *conjugated beams*, dimana nilai modulus elastisitas (E) untuk grid bambu diperoleh sebesar 9.107.142.857 kN/m² dan nilai modulus elastisitas (E) untuk tiang bambu sebesar 10.473.632 kN/m².

Tabel 2. Sifat-sifat material grid bambu

| No. | Parameter | Nama | Nilai |
|-----|---------------------------------------|-------|------------|
| 1 | Jenis perilaku material | Jenis | Elastic |
| 2 | Kekakuan normal (kN/m) | EA | 18.214.286 |
| 3 | Kekakuan lentur (kNm ² /m) | EI | 1.517.857 |
| 4 | Berat (kN/m/m) | W | 0,00145 |

Tabel 3. Sifat-sifat material tiang bambu

| No. | Parameter | Nama | Nilai |
|-----|---------------------------------------|-------|---------|
| 1 | Jenis perilaku material | Jenis | Elastic |
| 2 | Kekakuan normal (kN/m) | EA | 209.473 |
| 3 | Kekakuan lentur (kNm ² /m) | EI | 17.456 |
| 4 | Berat (kN/m/m) | W | 0,00501 |

Beban timbunan yang digunakan pada penelitian ini yaitu potongan besi berukuran 1,9 cm x 1,9 cm dengan panjang 4 cm. Berat volume potongan besi dari hasil pengukuran berat dibagi volume diperoleh nilai sebesar 79,55 kN/m³. Sifat-sifat material timbunan besi ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Sifat-sifat material besi

| No. | Parameter | Nama | Nilai |
|-----|--------------------------------|----------|----------------|
| 1 | Model material | Model | Linear Elastic |
| 2 | Jenis perilaku material | Jenis | Non-porous |
| 3 | Berat isi (kN/m ³) | γ | 79,554 |

Uji model timbunan di laboratorium dilakukan secara bertahap di atas tanah gambut yang diperkuat dengan grid bambu dan tiang. Berdasarkan uji model diperoleh data penurunan dan lendutan akibat beban timbunan. Hasil pengamatan di laboratorium akan dibandingkan dengan hasil Analisis Plaxis 2D.

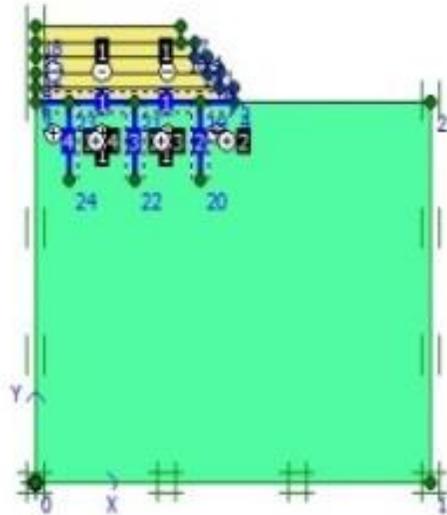
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Simulasi Numeris dengan Plaxis 2D

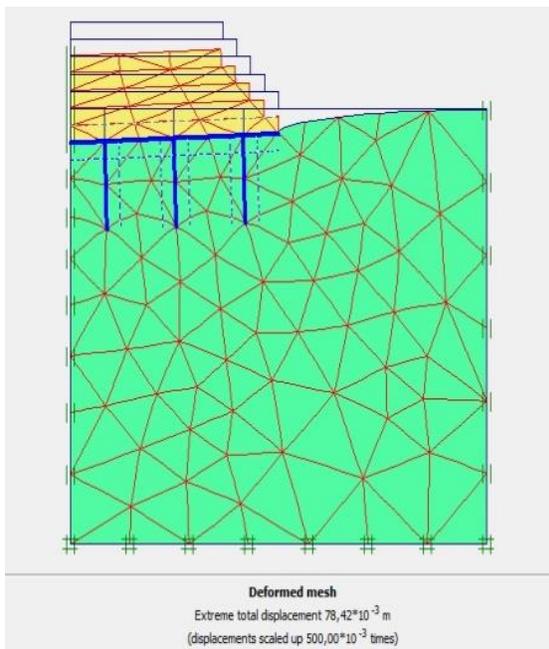
Model timbunan pada tanah gambut diidealisasikan sebagai regangan bidang (*plane strain*) dalam plaxis 2D. Ukuran geometri digambarkan sama dengan ukuran uji model di laboratorium. Beban timbunan diberikan secara bertahap sama dengan uji model beban yang diberikan.

Data-data setiap material dari Tabel 1 sampai Tabel 4 dimasukkan plaxis 2D dan hasilnya seperti Gambar 2. Karena bentuknya simetris, maka dalam simulasi cukup digambarkan setengah dari bentuk

model. Setelah mengikuti tahapan-tahapan hitungan yang ada, maka didapatkan hasil luaran analisis seperti Gambar 3.



Gambar 2. Input data dalam plaxis 2D



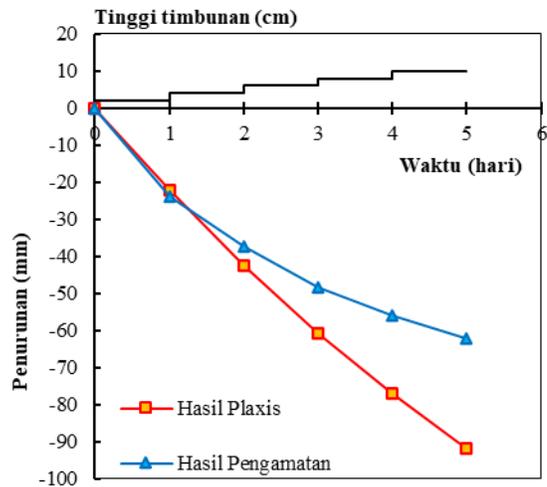
Gambar 3. Output hasil simulasi numeris dari plaxis 2D

3.2. Hasil Analisis Penurunan

Hasil analisis penurunan tanah gambut di tengah-tengah timbunan didapatkan pada setiap tahapan pembebanan. Uji beban timbunan dilakukan secara bertahap, baik pada uji model maupun pada simulasi numeris. Perbandingan hasil analisis penurunan dari simulasi numeris dan data pengamatan dari uji model di

laboratorium dapat dilihat pada Gambar 4 sampai Gambar 7.

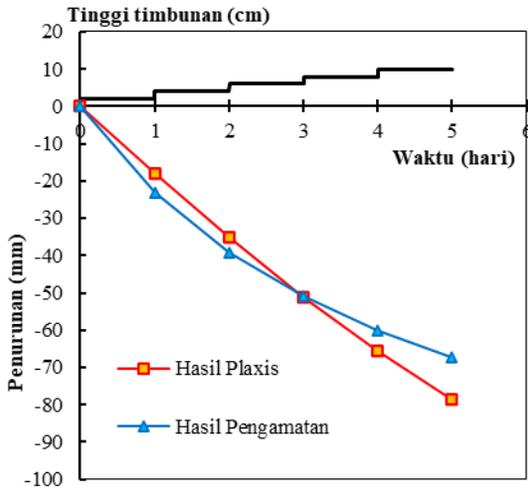
Nilai penurunan dari hasil simulasi numeris dengan plaxis terlihat lebih besar dibandingkan dengan data pengamatan pada gambut dengan perkuatan grid bambu tanpa tiang (Gambar 4). Penurunan pada awal pembebanan terlihat relatif sama antara hasil simulasi numeris dengan data pengamatan, namun pada beban-beban yang lebih besar penurunan dari hasil numeris cenderung lebih besar daripada data pengamatan. Secara keseluruhan terlihat bahwa perubahan penurunan semakin kecil sejalan dengan penambahan beban. Hal ini dapat disebabkan semakin tinggi beban yang diberikan, maka pemampatan tanah gambut semakin kecil. Perkuatan grid bambu tanpa tiang terlihat dapat menjaga stabilitas timbunan sehingga tidak mengalami kegagalan walaupun masih memperlihatkan penurunan yang cukup tinggi. Perkuatan grid bambu dapat meningkatkan daya dukung tanah gambut (Susanti *dkk.*, 2017).



Gambar 4. Penurunan pada gambut dengan perkuatan grid bambu

Perbandingan hasil analisis penurunan dan data pengamatan pada perkuatan tiang 10 cm dengan grid bambu dapat dilihat pada Gambar 5. Perilaku hubungan waktu dengan penurunan dari hasil simulasi numeris pada gambut dengan perkuatan grid bambu dan tiang $L = 10$ cm terlihat relatif berbeda dengan data pengamatan. Pola penurunan pada data pengamatan lebih melengkung dibandingkan hasil simulasi numeris. Sama seperti pada sistem perkuatan grid bambu tanpa tiang, akan tetapi pada sistem perkuatan tiang $L = 10$ cm dengan grid bambu terlihat bahwa penurunan dari hasil analisis numeris hampir sama dengan data pengalaman. Analisis penurunan pada sistem perkuatan tiang $L = 10$ cm lebih kecil dibandingkan dengan

perkuatan tanpa tiang. Dalam hal ini, tiang-tiang pancang dengan $L = 10$ cm dapat berkontribusi dalam mereduksi penurunan tanah akibat beban timbunan.



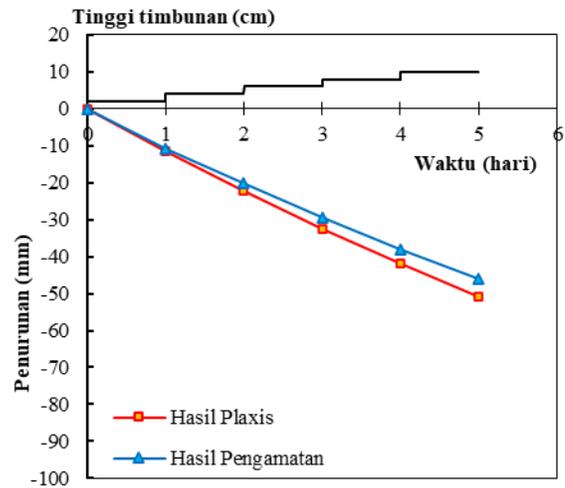
Gambar 5. Penurunan pada gambut dengan perkuatan grid bambu dan tiang $L = 10$ cm

Perbandingan hasil analisis penurunan dari simulasi numeris dengan data pengamatan pada gambut dengan perkuatan grid bambu dan tiang $L = 25$ cm ditunjukkan pada Gambar 6. Hasil analisis penurunan dari Plaxis sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan data pengamatan, namun dengan pola yang hampir sama. Perubahan penurunan berbanding lurus dengan perubahan waktu.

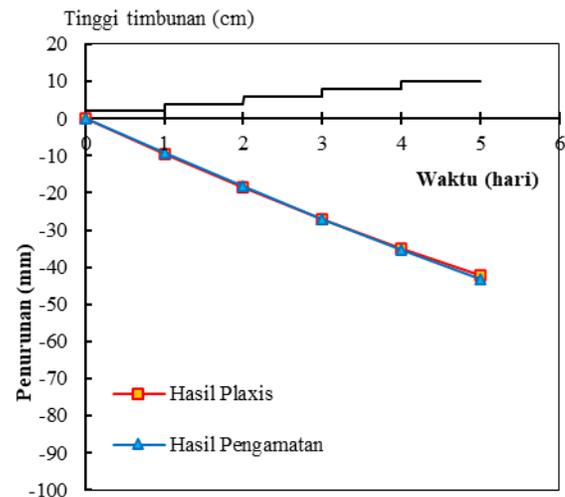
Nilai penurunan dari hasil analisis dan data pengamatan pada perkuatan grid bambu dengan tiang $L = 35$ cm diperlihatkan pada Gambar 7. Hasil analisis penurunan untuk perkuatan grid bambu dengan tiang $L = 35$ cm hampir sama dengan data pengamatan baik nilai maupun polanya. Hal ini menunjukkan bahwa analisis penurunan menggunakan Plaxis cukup dapat diandalkan dalam memperkirakan besar penurunan akibat beban timbunan.

Secara keseluruhan didapatkan bahwa penurunan pada tiang yang lebih panjang memberikan kontribusi yang lebih besar dalam hal mereduksi penurunan akibat beban timbunan. Nilai dan pola penurunan dari simulasi numeris dengan Plaxis 2D memperlihatkan hasil yang mendekati dengan data pengamatan terutama pada tiang-tiang yang lebih panjang. Penggunaan tiang-tiang bambu selain dapat mengurangi penurunan akibat beban timbunan juga berpotensi untuk dapat digunakan sebagai perkuatan untuk menahan timbunan (Maulana dkk., 2018). Penurunan akibat beban timbunan dan beban lainnya dapat berkurang secara signifikan dengan

penggunaan sistem perkuatan dari tiang-tiang (Puri dkk., 2017).



Gambar 6. Penurunan pada gambut dengan perkuatan grid bambu dan tiang $L = 25$ cm

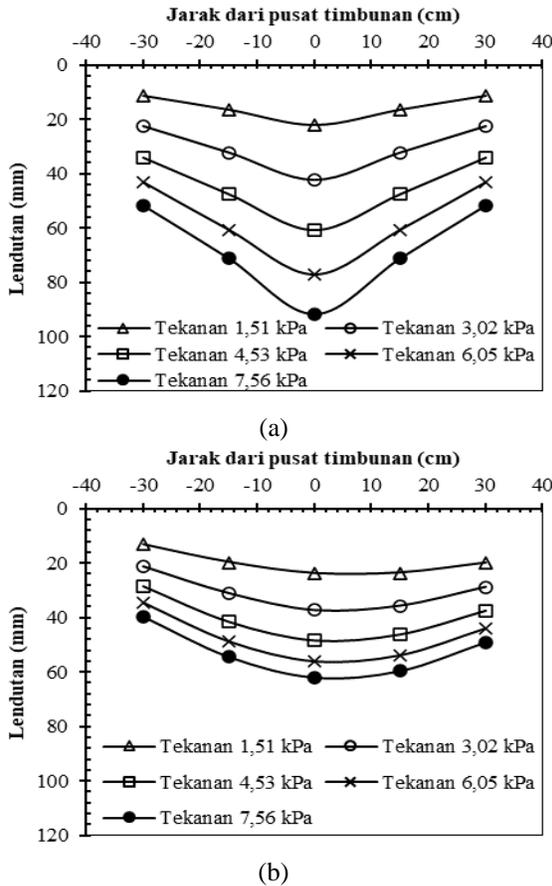


Gambar 7. Penurunan pada gambut dengan perkuatan grid bambu dan tiang $L = 35$ cm

Simulasi numeris menggunakan plaxis 2D model *plane strain* dapat digunakan sebagai salah satu metode yang akurat dalam menganalisis penurunan akibat beban timbunan pada tanah gambut yang diperkuat dengan grid bambu dan tiang dari berbagai variasi kedalaman. Secara umum hasil analisis penurunan dari simulasi numeris mendekati sama dengan data pengamatan, bahkan pada tiang yang lebih panjang memperlihatkan hasil yang sama dengan data pengamatan.

3.3. Hasil Analisis Lendutan

Hasil analisis lendutan grid bambu dari simulasi numeris dibandingkan dengan data pengamatan terlihat pada Gambar 8 sampai Gambar 11. Lendutan dianalisis di tengah timbunan dan pada jarak-jarak 15 cm dan 30 cm sebelah kiri dan kanan pusat timbunan.



Gambar 8. Lendutan pada gambut dengan perkuatan grid bambu: (a) Plaxis 2 D dan (b) Data pengamatan

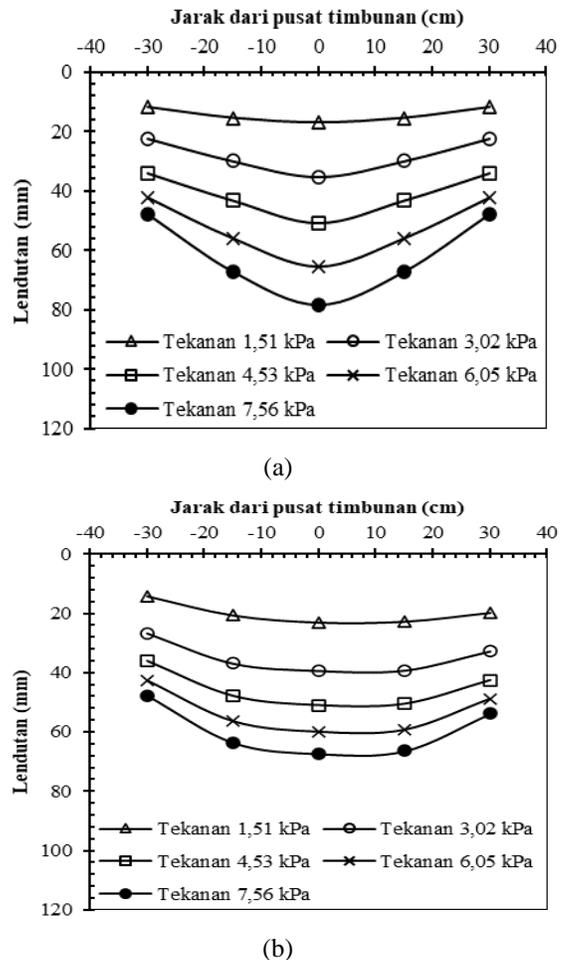
Lendutan dianalisis setiap tahapan pembebanan timbunan dengan tekanan 1,51 kPa, 3,02 kPa, 4,53 kPa, 6,05 kPa, dan 7,56 kPa. Bagian (a) dari setiap gambar merupakan hasil analisis lendutan dari simulasi numeris Plaxis dan bagian (b) merupakan hasil data pengamatan pada masing-masing model perkuatan grid bambu tanpa tiang, dengan tiang $L = 10$ cm, tiang $L = 25$ cm, dan tiang $L = 35$ cm.

Lendutan grid bambu tanpa tiang dari simulasi numeris dan data pengamatan dapat dilihat pada Gambar 8. Gambar 8a merupakan hasil analisis lendutan dan Gambar 8b merupakan data pengamatan.

Hasil analisis lendutan pada perkuatan grid bambu tanpa tiang terlihat lebih tinggi daripada data pengamatan, terutama lendutan di tengah-tengah timbunan. Lendutan di bagian kiri dan kanan pusat

timbunan terlihat mendekati sama dengan data pengamatan.

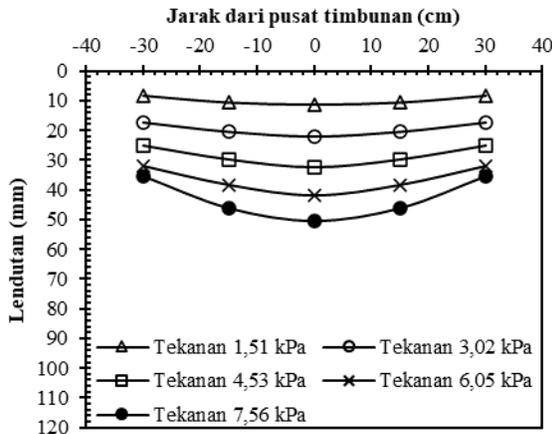
Lendutan sistem perkuatan grid bambu dengan tiang $L = 10$ cm pada gambut dari hasil analisis Plaxis 2D dan hasil pengamatan diperlihatkan pada Gambar 9. Perbedaan lendutan grid bambu yang diperkuat tiang dari keduanya terlihat semakin kecil pada grid bambu dengan tiang $L = 10$ cm.



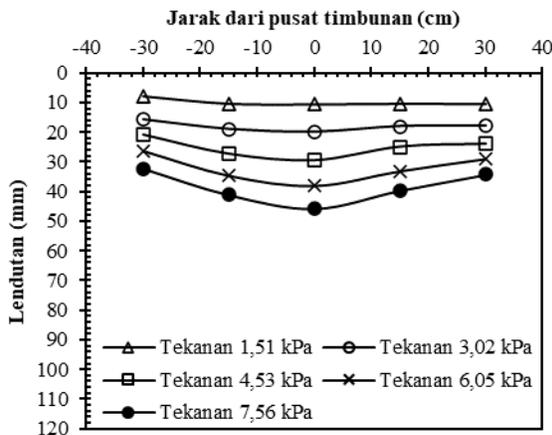
Gambar 9. Lendutan pada gambut dengan perkuatan grid bambu dengan tiang $L = 10$ cm: (a) Plaxis 2 D dan (b) Data pengamatan

Perbedaan lendutan perkuatan grid bambu yang diperkuat tiang dengan panjang $L = 25$ cm ditunjukkan pada Gambar 10. Hasil analisis lendutan grid bambu yang diperkuat tiang dengan panjang $L = 25$ cm dari simulasi numeris Plaxis 2D mendekati sama dengan data pengamatan, baik dari nilai maupun pola lendutannya. Tiang pancang berukuran $L = 25$ cm memperlihatkan dampak yang baik dalam mengurangi lendutan grid bambu. Lendutan yang terjadi semakin mengecil baik

berdasarkan hasil pengamatan maupun hasil analisis Plaxis 2D.



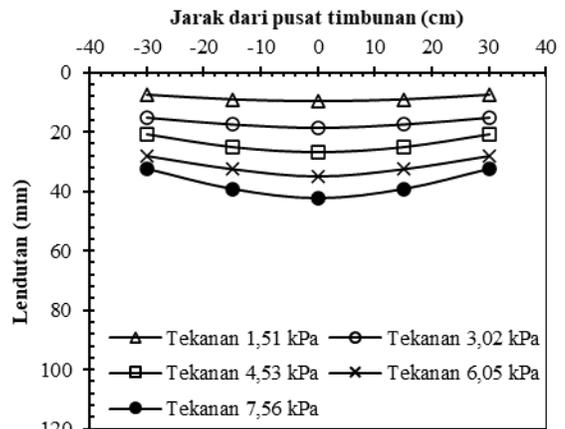
(a)



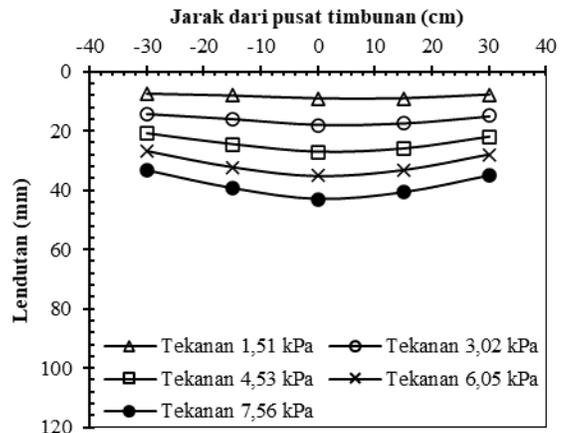
(b)

Gambar 10. Lendutan pada gambut dengan perkuatan grid bambu dengan tiang $L = 25$ cm: (a) Plaxis 2 D dan (b) Data pengamatan

Hasil simulasi numeris untuk menganalisis lendutan dibandingkan data pengamatan untuk grid bambu dengan tiang-tiang berukuran panjang $L = 35$ cm ditunjukkan pada **Gambar 11**. Lendutan hasil analisis numeris terlihat tidak jauh beda dengan data pengamatan. Nilai-nilai lendutan pada setiap titik pengamatan terlihat sama dengan hasil analisis lendutan dari simulasi numeris. Lendutan pada setiap tahapan beban memperlihatkan nilai dan pola yang hampir sama antara hasil analisis Plaxis 2 D dengan data pengamatan.



(a)



(b)

Gambar 11. Lendutan pada gambut dengan perkuatan grid bambu dengan tiang $L = 35$ cm: (a) Plaxis 2 D dan (b) Data pengamatan

Lendutan sistem perkuatan umumnya terlihat melengkung di pusat timbunan sebagai pusat beban. Lendutan yang terjadi mengikuti lendutan grid bambu. Grid bambu melengkung sejalan dengan beban timbunan yang semakin tinggi. Lendutan yang terjadi semakin mengecil setelah diperkuat dengan tiang-tiang pancang. Tiang yang lebih panjang memberikan pengaruh yang semakin baik dalam hal mengurangi lendutan grid bambu.

Hasil analisis lendutan dari simulasi numeris dengan Plaxis 2D memberikan nilai dan pola yang semakin sama dengan data pengamatan pada tiang-tiang yang lebih panjang. Tiang-tiang memiliki kinerja yang apabila diikat secara monolit dengan grid bambu (Saragih *dkk.*, 2020). Tiang-tiang dapat mengurangi penurunan, lendutan semakin kecil, dan modulus reaksi tanah dasar yang lebih besar (Waruwu *dkk.*, 2017).

Tiang-tiang pancang yang terikat dengan grid bambu mempunyai perilaku yang baik dalam

mengurangi penurunan dan lendutan. Penurunan yang semakin kecil dapat meningkatkan kestabilan timbunan dan keamanan konstruksi di atasnya.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem perkuatan tiang-tiang dengan kombinasi grid bambu memberikan kinerja yang baik dalam mengurangi penurunan akibat beban timbunan dan memperkecil lendutan grid bambu.
2. Secara umum hasil analisis penurunan dari simulasi numeris mendekati sama dengan data pengamatan, terutama untuk tiang-tiang yang lebih Panjang, walaupun pada grid bambu tanpa tiang dan dengan tiang yang lebih pendek menunjukkan hasil analisis simulasi numeris yang relatif lebih besar daripada data pengamatan.
3. Simulasi numeris menggunakan plaxis 2D model *plane strain* dapat digunakan sebagai salah satu metode yang akurat dalam menganalisis penurunan akibat beban timbunan pada tanah gambut yang diperkuat dengan grid bambu dan tiang-tiang.
4. Selain penurunan, analisis lendutan grid bambu dapat ditentukan dari simulasi numeris. Sebagian besar lendutan dari analisis numeris mendekati sama dengan data pengamatan, terutama pada tiang-tiang yang lebih panjang. Perbedaan lendutan grid bambu yang diperkuat tiang semakin kecil dengan semakin panjang tiang yang digunakan. Hal ini didapatkan pada grid bambu dengan tiang $L = 10$ cm, lendutan grid bambu dari hasil simulasi numeris sedikit dengan besar dibandingkan data pengamatan. Sedangkan pada grid bambu dengan tiang $L = 25$ cm dan 35 cm didapatkan bahwa lendutan hasil analisis numeris mendekati sama dengan data pengamatan. Pola penurunan dan lendutan hasil analisis numeris lebih baik dibandingkan dengan data pengamatan.

Ucapan Terima Kasih

Bersama ini tim penulis mengucapkan terimakasih dan penghargaan sebesar-besarnya terhadap pihak-pihak yang terlibat dalam penelitian, baik tim Laboratorium Mekanika Tanah maupun pihak Universitas Simalungun yang memberikan dukungan dan motivasi dalam pelaksanaan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Balasubramaniam, A. S., H Cai, D. Z., Surarak, C. & Oh, E. Y. N., 2010. Settlements of Embankments in Soft Soils. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 41(2), pp. 1-19.
- Hardiyatmo, H. C. 2011. Method to Analyze the Deflection of The Nailed-Slab System. *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, 11(4), pp. 22-28.
- Hegde, A., & Sitharam, T. G. 2015. Use of bamboo in soft-ground engineering and its performance comparison with geosynthetics: experimental studies. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(9) 1-9.
- Kokasih, P. B., 2012. *Teori dan Aplikasi Metode Elemen Hingga*. 1 ed. Yogyakarta: Penerbit Andi.
- Liu, H. L., Ng, C. W., & Fei, K. 2007. Performance of a Geogrid-Reinforced and Pile-Supported Highway Embankment over Soft Clay: Case Study. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(12), pp. 1483-1493.
- Marto, A., & Othman, B.A. 2011. The potential use of bamboo as green material for soft clay reinforcement system. *International Conference on Environment Science and Engineering*, Singapore, (pp. 129-133).
- Maulana, Azwar, Susanti, R. D., & Waruwu, A. 2018. Potential of bamboo pile as reinforcement of peat soil under embankment. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(1), 52-56.
- Meyer, R. V., dan Shao, Y. 2005. Geogrid-Reinforced and Pile-Supported Roadway Embankment. *GSP 131 Contemporary Issues in Foundation Engineering*, ASCE.
- Mochtar, N.E., Yulinato, F.E., dan Rendy, T. 2014. Pengaruh Usia Stabilisasi pada Tanah Gambut Berserat yang Distabilisasi dengan Campuran CaCO₃ dan Pozolan. *Jurnal Teknik Sipil*, 21(1) : 57-63.
- Porbaha, A., Hanzawa, H., & Kishida, T. 2000. Analysis of a Failed Embankment on Peaty Ground. *Slope Stability 2000*, (pp. 281-293).
- Puri, A., Suhendro, B., & Rifa'i, A. 2017. Effect of Vertical Wall Barrier on The Rigid Pavement Deflection of Full Scale 1-Pile Row Nailed-Slab System on Soft Subgrade. *International Journal of Geomate*, 12(32), pp. 25-29.
- Rowe, R. K., & Li A. L. 2005. Geosynthetic-Reinforced Embankments over Soft Foundations. *Geosynthetics International*, 12(1), pp. 50-85.
- Sasaki, Y., Kano, S., & Tsuji, T. 2004. Embankment Reinforcement by Geogrid to Reduce Its Settlement During Earthquakes. *13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada*, Paper (No. 642).
- Saragih, D. S., Sianturi, N. M., Purba, V. E., Damanik, D. R. S. 2020. Potensi Kawat Baja Sebagai Pengikat Tiang Dengan Pelat dalam Menahan Beban. *Teknik*, 41(3), pp. 219-224.

- Sianturi, N. M., & Saragih, D. 2020. Evaluasi Pembangunan Drainase Ringroad Pangururan - Tomok STA 32+000 Sampai Dengan STA 38+000 Di Kabupaten Samosir. *Jurnal Santeksipil*, 1(1), pp. 62-75.
- Susanti, R. D., Maulana, & Waruwu, A. 2017. Bearing Capacity Improvement of Peat Soil by Preloading. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(1), pp. 121-124.
- Vakher, M., 2000. Load-Deformation Performance of Peat Soil Under Large Concrete Plates. In *Geotechnical Measurements: Lab and Field* (pp. 44-55).
- Waruwu, A., & Susanti, R. D. 2015. Behavior of soil peat with reinforcement of bamboo grid. *IOSR Journal of Engineering*, 5(11), pp. 29-36.
- Waruwu, A., Hardiyatmo, H. C., & Rifa'i, A. 2016. Compressive Behavior of Bagansiapiapi-Riau Peat in Indonesia. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 21(16), pp. 5217-5227.
- Waruwu, A., Hardiyatmo, H. C., & Rifa'i, A. 2017. Deflection behavior of the nailed slab system-supported embankment on peat soil. *Journal of Applied Engineering Science*, 15(4), 556 - 563.
- Waruwu, A., Halim, H., Nasution, T., & Hanova, Y. 2018. Bamboo Grid Reinforcement on Peat Soil under Repeated Loading. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(8): 2190-2196.
- Waruwu, A. & Nasution, T. H. 2020. Analisis Penurunan Tanah Gambut dengan Timbunan yang Diperkuat Grid Bambu dan Tiang Beton. *Jurnal Jalan-Jembatan*, 37(1): 15-27.
- Yulianto, F.E. and Mochtar, N.E., 2012, September. Behavior of Fibrous Peat Soil Stabilized with Rice Husk Ash (RHA) and Lime. In Proceedings of 8th International Symposium on Lowland Technology September (pp. 11-13).