

BAHAYA TEKUK PONDASI
TIANG LANGSING DALAM TANAH LUNAK KOHESIF

Indrastono Dwi Atmanto *)

Abstract

This paper treats the buckling of slender piles completely embedded in soft cohesive soils. Usually these soils were assumed to behave elastically and were theoretically replaced by horizontal springs supporting the piles. However, soft soils deform as plastic materials. Therefore, it is suggested to assume a lateral support independent of the amount of the lateral displacement and accordingly to calculate a model; hereby the safety against buckling of the piles is computed. It is shown that an ideally straight, centrally loaded pile does not buckle until the stresses in the pile material exceed the elastic range. The shape of the pile axis, however, is most important. Only a very little deviation from a straight line, because the pile is bent elastically or stressless, causes a rapid decrease of the maximum pile-load in dependency of the shear resistance of the soils with the increase of the deviation. The proposed model is also applied for eccentrically piles, i.e. a vertical load as well as a bending moment act on the pile top.

Key words : slender piles, buckling, soft soils, cohesive

Pendahuluan

Dalam rancang bangun pondasi tiang di tanah lunak timbul permasalahan bahaya tekuk akibat tekanan lateral tanah serta pengaruh konsistensi tanah terhadap bahaya tekuk tersebut, utamanya pada pondasi tiang dengan derajat kelangsingan yang tinggi. Forsell (1918) memperkenalkan model elastis untuk pertama kalinya dalam penyelesaian bahaya tekuk pondasi tiang dengan asumsi :

1. Tiang dianggap sebagai batang dengan perletakan sendi pada kedua ujungnya.
2. Sumbu tiang berbentuk garis lurus, sebelum menerima beban aksial.
3. Tanah dianggap berperilaku sebagai medium ideal elastis.
4. Karakteristik elastisitas medium tidak dipengaruhi oleh kedalaman tiang.

Model elastis tersebut dapat dilukiskan sebagai batang dengan sendi pada kedua ujungnya dan ditumpu oleh susunan pegas pada satu sisinya. Pemodelan tekuk elastis tersebut memberikan hasil bahwa besarnya gaya tekuk tidak dipengaruhi panjang tiang, melainkan hanya bergantung pada geometri dan karakteristik kekuatan bahan tiang serta karakteristik

elastisitas tanah. Dalam aplikasi model elastis tiang faktor yang sangat menentukan adalah modulus reaksi tekanan tanah horisontal (c) yang merupakan produk perkalian antara diameter atau panjang sisi tampang tiang (b) dengan konstanta pegas (k). Forsell (1918) memberikan nilai c secara empiris, misalnya untuk tanah pasir $k = 1,0 \text{ kp/cm}^3$ sehingga diperoleh $c = 1,0 \cdot b \text{ (kp/cm}^2\text{)}$. Granholm (1929) beranggapan bahwa modulus reaksi tekanan tanah horisontal selain dipengaruhi oleh modulus geser tanah juga dipengaruhi oleh dimensi tiang. Meskipun model-model elastis dapat mensimulasi bahaya tekuk tiang, namun perlu dikaji ulang apakah tanah lunak kohesif seperti lempung, lanau atau tanah organik berperilaku sebagai medium ideal elastis sesuai dengan asumsi model tersebut, akan dijelaskan lebih lanjut dalam tulisan ini.

Karakteristik Tanah Lunak Kohesif

Berbeda dengan tanah granuler seperti pasir atau kerikil maka karakteristik kekuatan tanah kohesif sangat dipengaruhi oleh kadar air atau konsistensi yang dapat berupa cair, plastis, semi padat atau padat. Batas-batas konsistensi dinyatakan sbb :

$K < 0$ → cair
 $K = 0 - 0,25$ → plastis cair
 $K = 0,25 - 0,50$ → plastis sangat lunak

$K = 0,50 - 0,75$ → plastis lunak
 $K = 0,75 - 1,0$ → plastis kaku
 $K > 1,0$ → semi padat

Hingga nilai konsistensi $K > 0,75$ tanah kohesif masih sesuai untuk digunakan sebagai dasar pondasi, sedangkan dalam rentang konsistensi plastis lunak harus diperhitungkan penurunan yang besar. Untuk nilai $K = 0,5$ masih dimungkinkan penggunaan pondasi dangkal dalam kasus-kasus tertentu, sedangkan untuk beban-beban yang besar diperlukan pondasi tiang sehingga mencapai tanah keras. Kajian mengenai bahaya tekuk pondasi tiang ramping dalam tulisan ini berlaku untuk tanah lunak kohesif dengan

nilai konsistensi $K < 0,5$. Tanah semacam ini umumnya berupa tanah aluvial di wilayah pantai dalam kondisi pra konsolidasi. Mekanika tanah pada umumnya menganalisis tanah kohesif yang masih layak digunakan sebagai dasar pondasi atau bahan bangunan (misal bendungan tanah) dengan nilai konsistensi $K > 0,5$; di mana nilai kuat gesernya setara dengan tanah pasir atau kerikil. Namun untuk komponen gaya geser yang langsung dipengaruhi oleh gaya normal, pada tanah kohesif masih terdapat pula nilai kohesi yang tidak tergantung pembebanan namun secara hakiki hanya dipengaruhi oleh pra pembebanan. Dengan meningkatnya kadar air maka tanah kohesif akan kehilangan kuat gesernya dan berpe-

*) Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Diponegoro

Perilaku seperti medium plastis atau fluida kental. Untuk rentang konsistensi $K < 0,5$ yang dikaji dalam tulisan ini maka perilaku tanah kohesif dapat dianggap sebagai massa Bingham. Tanah lunak kohesif akan mulai mengalir apabila tegangan-tegangan melampaui nilai tertentu; titik di mana mulai terjadi aliran disebut batas cair. Batas cair secara rheologi harus dibedakan secara tegas terhadap definisi batas cair dalam mekanika tanah (batas cair pada kondisi antara konsistensi cair dengan plastis). Perilaku rheologi massa Bingham atau massa ideal plastis dapat dinyatakan sbb :

$$\tau = \tau_0 + \eta D \quad (1)$$

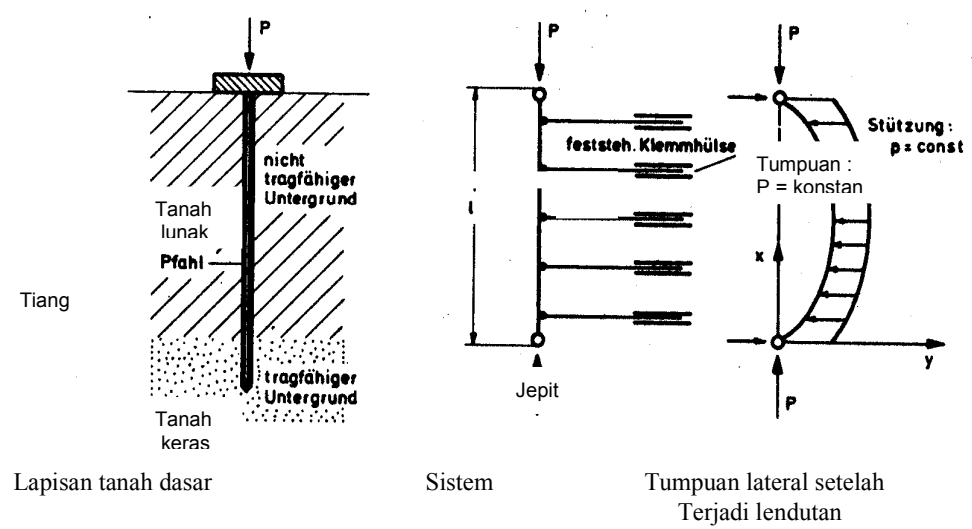
- τ = tegangan geser
- τ_0 = tegangan geser pada batas cair
- η = viskositas
- D = gradien kecepatan geser

Berbeda dari massa ideal plastis, di mana berlaku hubungan linier antara tegangan geser dan gradien kecepatan geser, maka dalam tanah lunak kohesif terjadi anomali aliran akibat sifat tiksotropi; sehingga tanah bersifat kuasi plastis. Berdasarkan kenyataan tersebut akan dibahas mengenai kemungkinan penerapan modulus reaksi tanah horisontal. Konsep modulus reaksi tanah horisontal dalam model elastis mensyaratkan bahwa medium berperilaku elastis sehingga terjadi hubungan linier regangan - tegangan. Tanah lunak kohesif dengan pembebanan lateral yang berlangsung cepat tidak akan berperilaku elastis melainkan plastis, sehingga konsep modulus reaksi horisontal sudah tidak sesuai lagi. Karena itu parameter kapasitas dukung horisontal tidak dipengaruhi lagi oleh deformasi melainkan bergantung pada tegangan patah tanah menurut teori plastisitas.

Model Tekuk Pondasi Tiang Langsing Dalam Tanah Lunak Kohesif

Model tekuk elastis pondasi tiang hanya berlaku untuk tanah granuler dan tanah kohesif kenyal, sedangkan untuk tanah lunak kohesif model tersebut tidak dapat diterapkan lagi. Tanah lunak kohesif dengan $K < 0,5$ berperilaku sebagai massa Bingham. Kenaikan pembebanan sampai batas tertentu menyebabkan terjadinya aliran tanpa penambahan tegangan pada bidang kontak. Apabila fenomena tersebut ditransformasikan terhadap permasalahan tekuk pondasi tiang langsing dalam tanah lunak kohesif maka dapat disimpulkan bahwa gaya reaksi tekanan tanah lateral hanya dapat mencapai nilai tertentu, karena deformasi tiang ditahan oleh tanah di sekelilingnya. Namun jika tegangan yang terjadi melebihi gaya reaksi tekanan tanah lateral yang mungkin timbul maka tanah akan mulai mencair sehingga tiang akan mulai melendut. Reaksi tekanan tanah lateral akan tetap konstan tanpa dipengaruhi besarnya deformasi lateral. Besarnya reaksi tekanan tanah horisontal hanya dipengaruhi oleh sifat-sifat fisik tanah, bentuk geometri dan besaran-besaran statis tiang.

Untuk penyelidikan beban batas perlu ditinjau kasus di mana tiang telah mengalami lendutan samping sehingga pada dinding tiang bekerja reaksi tekanan tanah horisontal. Selanjutnya dianggap bahwa pembebanan berlangsung sedemikian cepat sehingga dimungkinkan terjadinya lendutan secara cepat pula. Untuk kondisi pembebanan demikian maka tanah lunak kohesif dapat dianggap tak termampatkan hingga terjadinya keruntuhan. Jadi reaksi tekanan tanah lateral pada tanah lunak dapat dianggap konstan (tidak terpengaruh deformasi) dan dapat dibuat model tekuk plastis pondasi tiang seperti tersaji pada gbr. 1.



Gbr. 1 Model tekuk plastis pondasi tiang dalam tanah lunak kohesif.

Beban Batas Untuk Model Plastis

Untuk menentukan beban tekuk pondasi tiang dalam tanah lunak kohesif dapat digunakan metoda energi, di mana nilai kritis pembebanan vertikal merupakan jumlah dari kerja yang dilakukan gaya-gaya aksial ΔT ditambah energi ΔU dari lendutan tiang dan gaya-gaya reaksi tekanan tanah lateral.

Komponen kerja beban tekan disajikan sbb :

$$\Delta U_T = \frac{P \pi^2}{4l} \sum_{n=1}^{n=\infty} n^2 a_n^2 \quad (2)$$

Energi deformasi akibat lendutan adalah sbb :

$$\Delta U_1 = \frac{\pi^4 E_p I}{4l^3} \sum_{n=1}^{n=\infty} n^4 a_n^2 \quad (3)$$

Komponen energi reaksi tekanan tanah lateral :

$$\Delta U_2 = \frac{2pl}{\pi} \sum_{n=1}^{n=\infty} a_n \quad (4)$$

Dengan prinsip metoda energi tersebut diperoleh beban batas untuk model plastis sbb :

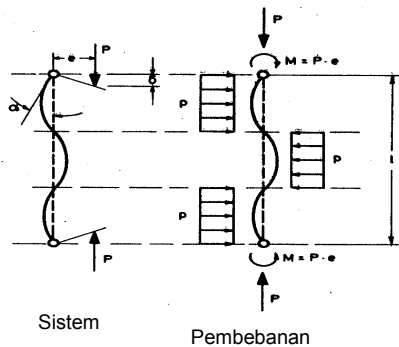
Bentuk tampang tiang persegi :

$$P_{\min} = 4 \left(\frac{32 \tau_0 (2 + 2\pi) b E_p I}{\pi a_{m,0}} \right)^{0.5} \quad (5)$$

Bentuk tampang tiang bulat :

$$P_{\min} = 4 \left(\frac{25,6 \tau_0 (2 + 2\pi) b E_p I}{\pi a_{m,0}} \right)^{0.5} \quad (6)$$

Ternyata bahwa besarnya beban tekuk ultimit pondasi tiang sangat dipengaruhi oleh kuat geser awal tanah.



Gbr. 2 Sistem pembebanan eksentris pondasi tiang.

Pada tiang pondasi dengan beban eksentris (gbr. 2) ditinjau garis lendutan hasil superposisi kurva sinusoidal, di mana terjadi perputaran kepala atau kaki tiang searah momen.

Komponen kerja beban tekan :

$$\Delta T_1 = \frac{P \pi^2}{4l} \sum_{n=1}^{n=\infty} a_n^2 (2n-1)^2 \quad (7)$$

$$\Delta T_2 = \frac{2\pi e P}{l} \sum_{n=1}^{n=\infty} (2n-1) a_n \quad (8)$$

Energi deformasi akibat lendutan :

$$\Delta U_1 = \frac{E_p I}{4l^3} \sum_{n=1}^{n=\infty} a_n^2 (2n-1)^4 \quad (9)$$

$$\Delta U_2 = \frac{2pl}{\pi} \sum_{n=1}^{n=\infty} a_n \quad (10)$$

Berdasarkan prinsip kesetimbangan beban dan energi $\Delta T_1 + \Delta T_2 = \Delta U_1 + \Delta U_2$ dapat diperoleh beban batas :

$$P = \frac{\pi^2 E_p I a_m (2m-1)^4 + (8pl^4/\pi^5 E_p I)}{l^2 a_m (2m-1)^2 + 8e/\pi (2m-1)} \quad (11)$$

Arti notasi dalam rumus-rumus di atas adalah :

- ΔT = Jumlah kerja gaya-gaya aksial
- ΔU = Jumlah energi deformasi
- P = Beban tekuk
- p = Reaksi tekanan tanah lateral
- a, m, n = Koefisien persamaan
- E_p = Modulus elastisitas bahan tiang
- I = Momen inersia tampang tiang
- τ_0 = Tegangan geser awal massa tanah
- b = Panjang sisi atau diameter tiang
- e = Eksentrisitas sumbu tiang

Pengujian terhadap model matematis di atas dilakukan dengan serangkaian percobaan laboratorium terhadap pembebanan model pondasi tiang langsing dalam tanah lunak kohesif dengan berbagai nilai konsistensi sehingga terjadi lendutan lateral (seri percobaan A). Juga dilakukan pengujian pembebanan terhadap tiang-tiang dengan berbagai variasi panjang, di mana secara lateral ditahan oleh berbagai gaya yang berbeda dan tidak dipengaruhi oleh besarnya gerakan (seri percobaan B). Hasil penyelidikan tersebut secara ringkas disajikan sbb :

1. Hasil seri percobaan A di mana tiang model tertanam dalam tanah lunak kohesif menunjukkan kesesuaian dengan hasil seri percobaan B, di mana digunakan tumpuan samping menurut gaga-

san model plastis melalui gaya-gaya yang tak dipengaruhi oleh deformasi lateral. Dalam hal ini jelas bahwa tanah yang membungkus tiang benar-benar berperilaku sebagai medium plastis, sehingga dapat diterapkan parameter kapasitas dukung horisontal (yang tidak dipengaruhi deformasi) pada tanah lunak kohesif.

2. Tanpa mengabaikan faktor presisi dalam pelaksanaan percobaan ternyata hasil pengukuran menunjukkan keselarasan yang tinggi terhadap beban batas hasil perhitungan berdasarkan model plastis; dengan demikian persyaratan pemakaian model plastis terpenuhi.
3. Dalam percobaan model di laboratorium tidak dapat dihindari terjadinya lendutan awal tiang akibat eksentrisitas beban, sehingga berpengaruh terhadap besarnya beban batas. Pada tiang ramping dalam skala sebenarnya terjadi lendutan yang jauh lebih besar. Fakta ini harus diperhitungkan dalam mentransformasikan hasil percobaan model dalam penentuan kapasitas dukung pondasi tiang.

baan model dalam penentuan kapasitas dukung pondasi tiang.

Dari literatur dapat ditemukan hasil percobaan lapangan terhadap bahaya tekuk pondasi tiang dalam tanah lunak kohesif (Brandtzaeg & Harboe, 1957). Dalam percobaan tersebut digunakan empat buah tiang pancang baja berbentuk lingkaran berdiameter 30 mm dan sebuah tiang baja vignole. Dalam tes pembebanan dilakukan secara bertahap 1 Mp untuk tiang baja bulat dan 10 - 20 Mp untuk tiang baja vignole. Tanah dasar terdiri dari tanah pasir setinggi 3 - 5 m, di bawahnya tanah lempung setebal 23 - 29 m di mana lapis teratas setebal 7 - 8 m berkadar air sangat tinggi ($\tau = 1 - 2 \text{ Mp/m}^2$). Di bawah lapisan lempung terdapat lapisan tanah granuler setebal 10 m dan terletak di atas lapisan tanah keras. Tiang-tiang tersebut dipancang hingga mencapai tanah keras dan hasil percobaan tersebut secara ringkas disajikan dalam tabel 1.

Tabel 1 Hasil tes pembebanan tiang (Brandtzaeg, Harboe, 1957)

| No. Tiang | Tipe tiang | Panjang tiang | | Beban batas (Mp) | Tegangan Batas (Kp/cm ²) |
|-----------|---|---------------|----------------------|------------------|--------------------------------------|
| | | Total (m) | Di tanah lempung (m) | | |
| 1 | Profil bulat | 37 | 24 | 9,0 | 1.27 |
| 2 | d = 3 cm | 27,4 | 24 | 16,0 | 2.26 |
| 3 | F = 7,07 cm ² | 37 | 24 | 11,0 | 1.55 |
| 4 | I = 3,97 cm ⁴ | 36 | 24 | 9,0 | 1.27 |
| 5 | Profil Vignole d = 11,6 cm F = 43 cm ² I _{min} = 210 cm ⁴ | 32 | 25 | 120 | 2.79 |
| 6 | Profil Vignole d = 17,3 cm F = 44 cm ² I _{min} = 350 cm ⁴ | 36 | 22 | 160 | 3.63 |

Beberapa hal menarik diperoleh dari hasil tes tiang nomor 5, di mana tiang tersebut diberi 'loading' dan 'unloading'. Pada tahap pembebanan keempat beban dinaikkan menjadi 120 Mp, namun dalam waktu 2,5 jam kapasitas dukung turun menjadi 40 Mp. Tiang-tiang nomor 1 hingga 5 dicabut setelah tes selesai dan diselidiki, ternyata pada kedalaman 5 -10 m tiang-tiang tersebut mengalami tekuk. Tiang nomor 6 tidak dicabut, namun dari diagram beban-penurunan dapat diketahui bahwa tiang tersebut mengalami tekuk pula. Dalam penelitian lebih lanjut dilakukan pula pengukuran panjang tiang sehingga dapat diketahui besarnya lendutan samping, hasilnya disajikan dalam tabel 2.

Tabel 2 Deformasi lateral tiang percobaan

| Tiang No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------|------|------|------|------|-------|
| Panjang tekuk (m) | 1,95 | 0,95 | 1,60 | 1,30 | 4,30 |
| Deformasi lateral (cm) | 2,50 | 3,50 | 2,00 | 3,00 | 14,00 |

Kesimpulan Dan Saran

Bahaya tekuk tiang langsing dalam tanah lunak kohesif sangat dipengaruhi oleh perilaku tanah tersebut. Pada tanah lunak kohesif dengan konsistensi $K < 0,5$ tanah tersebut tidak lagi berperilaku sebagai medium elastis melainkan plastis. Dengan demikian kapasitas dukung lateral tanah tidak ditentukan oleh besarnya deformasi lateral namun semata-mata hanya oleh tegangan patah tanah. Faktor aman terhadap bahaya tekuk dapat ditentukan berdasarkan teori

plastisitas, yang besarnya dipengaruhi oleh geometri tiang dan kuat geser tanah. Pada model plastis yang mengacu pada metoda energi beban batas tiang dengan beban sentris, terbukti bahwa tiang tidak mengalami deformasi lateral selama tegangan-tegangan di dalam bahan tiang tidak melampaui zona elastis. Model plastis tersebut hanya berlaku untuk tiang di mana sumbu tiang hanya sedikit mengalami deviasi; apabila tidak dipenuhi persyaratan ini maka beban batas tiang akan mengalami penurunan.

Beban batas tiang langsing dalam tanah lunak kohesif ditentukan oleh faktor geometri dan besaran statis tiang, bentuk sumbu tiang pada kondisi akhir dan kuat geser tanah. Dari deformasi yang terjadi pada tiang dapat ditentukan besarnya beban batas. Apabila setelah pemancangan tiang masih terjadi deformasi sumbu tiang lebih lanjut maka perlu dilakukan taksiran lebih dahulu dan deformasi terukur dapat disuperposisikan dengan kondisi akhir tiang. Perlu diperhatikan bahwa selain beban merata di atas tanah maka bahaya tekuk dapat juga terjadi akibat gerakan massa tanah. Nilai kuat geser tanah yang sangat mempengaruhi tahanan lateral tiang perlu diselidiki secara cermat baik melalui penyelidikan lapangan maupun laboratorium sehingga dapat ditentukan pula kuat geser tanah di sekitar zona pengaruh tiang.

Daftar Pustaka

1. Bingham, E.C., *Fluidity and Plasticity*, McGraw-Hill, New York, 1922.
2. Brandtzaeg, A. ; Harboe, E., *Buckling tests of slender steel piles in soft quick clay*, ICSMFE, Vol. II, p.19, London 1957.
3. Forsell, C., *Beräkning av palar*, Betong, Heft 3, Seite 54, Band 82, Stockholm, 1918.
4. Granholm, H., *On the elastic stability of piles surrounded by a supporting medium*, Ingeniörsvetenskapsakademiens Handlingar Nr. 89, Stockholm, 1929.
5. Prager, W. ; Hodge, P.G, *Theorie ideal plastischer Körper*, Springer-Verlag, Wien, 1954.
6. Wenz, K.P., *Das Knicken von schlanken Pfählen in weichen bindigen Erdstoffen*, T.H Karlsruhe, 1972.
7. Rizkallah, V., *Pfahlgründungen*, Universität Hannover, 2009.

