



INTISARI

Vegetasi, terutama pepohonan, memainkan peran penting dalam menjaga stabilitas lereng melalui efek hidro-mekanis. Secara hidrologis, pohon berperan dalam mengintersepsi air hujan yang memperlambat limpasan permukaan. Secara mekanis, sistem perakaran pohon meningkatkan kohesi tanah, umumnya disebut kohesi akar (c_r). Namun demikian, pohon dapat memberikan beban tambahan (*surcharge*) pada lereng, dimana hal tersebut berpotensi meningkatkan tegangan geser pada lereng. Kedua mekanisme ini sangat dipengaruhi oleh kepadatan pohon karena kompetisi antar pohon untuk mendapatkan air dan nutrisi menentukan perkembangan akar, alokasi biomassa, serta kohesi akar. Meskipun peran pohon dan struktur akar dalam menstabilkan lereng telah banyak dikaji, pengaruh kepadatan pohon terhadap interaksi simultan antara kompetisi antar akar, kohesi akar, dan peningkatan beban pada lereng masih belum terkuantifikasi dengan baik. Sehingga, studi ini bertujuan mengevaluasi bagaimana variasi kepadatan pohon memengaruhi stabilitas lereng dengan mempertimbangkan kohesi akar dan beban biomassa.

Penelitian ini menggunakan simulasi numerik dengan mengintegrasikan RDM, RBMw, dan analisis elemen hingga menggunakan PLAXIS 2D. RDM digunakan untuk mengestimasi distribusi spasial akar pada berbagai tahap pertumbuhan dengan mengasumsikan distribusi azimuth yang seragam di sekitar batang. Perkuatan akar dihitung dengan RBMw yang mengasumsikan kekuatan tarik akar tidak bersifat seragam dalam satu kelas diameter sehingga memungkinkan kegagalan progresif akar. Kemudian, analisis stabilitas lereng menggunakan PLAXIS 2D dengan *Strength Reduction Method* (SRM). *Cryptomeria japonica* dipilih sebagai spesies berakar dangkal yang representatif, dengan mempertimbangkan kepadatan pohon dari 400-3500 pohon/ha dan ketebalan tanah dari 1–2,5 m. Analisis dilakukan pada kondisi statis dan dinamis dengan koefisien gempa lateral (k_h) 0,1; 0,15; dan 0,2 g, yang menggambarkan variasi intensitas gempa dari gempa kuat hingga sangat kuat dan merusak.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pohon memengaruhi stabilitas lereng, baik meningkatkan maupun menurunkan, mengikuti respon non-linear terhadap kepadatan. Pada kepadatan rendah (400–1500 pohon/ha), akar berkembang dan menyebar luas, sedangkan pada kepadatan tinggi (2000–3500 pohon/ha), distribusinya menurun hingga 88,4% karena kompetisi dan keterbatasan ruang menghambat pembentukan akar kasar (> 2 mm). Berdasarkan hasil analisis, akar dapat meningkatkan kohesi tanah hingga 484,25%, di mana c_r tertinggi (48,4 kPa) dihasilkan oleh kepadatan 400 pohon/ha, sedangkan c_r terendah (0,53 kPa) dihasilkan oleh kepadatan 3500 pohon/ha. Dampaknya, SF lereng pada ketebalan tanah 1 m meningkat hingga 15% (statis) dan 24% (dinamis). Namun demikian, pada kepadatan tinggi, terjadi penurunan c_r sebesar 98,91% (dibandingkan kepadatan 400 pohon/ha), yang menyebabkan penurunan SF sebesar 6% pada kondisi statis dan dinamis. Untuk ketebalan tanah > 1 m, tidak ada kenaikan SF yang dapat diamati akibat peningkatan massa tanah yang mendominasi respon stabilitas sehingga perkuatan akar diabaikan. Kemudian, terjadi penurunan berat pohon hingga 98,5% seiring meningkatnya kepadatan pohon, yaitu dari 13,07 kN menjadi 0,2 kN, artinya kepadatan pohon yang tinggi memberikan beban yang lebih kecil dan merata terhadap lereng. Sehingga, penelitian ini mengindikasikan bahwa kemampuan perkuatan akar dan berat individu pohon dalam analisis stabilitas lereng dipengaruhi oleh faktor kepadatan pohon. Namun demikian, belum dapat ditentukan nilai kepadatan pohon yang optimal dalam rentang variasi kepadatan yang diuji, sehingga diperlukan penelitian lanjutan untuk memperoleh hubungan yang lebih pasti.

Kata kunci: Distribusi akar, perkuatan akar, berat pohon, kepadatan pohon, stabilitas lereng.



ABSTRACT

Vegetation, especially trees, plays an important role in maintaining slope stability through hydro-mechanical effects. Hydrologically, trees intercept rainwater, which slows surface runoff. Mechanically, tree root systems increase soil cohesion, commonly referred to as root cohesion (c_r). However, trees can also impose an additional load (surcharge) on slopes, which has the potential to increase shear stress on the slope. Both of these mechanisms are strongly influenced by tree density, as competition between trees for water and nutrients determines root development, biomass allocation, and root cohesion. Although the role of trees and root structures in slope stabilization has been extensively studied, the influence of tree density on the simultaneous interaction between root competition, root cohesion, and increased slope load has not been well quantified. Therefore, this study aims to evaluate how variations in tree density affect slope stability by considering root cohesion and biomass load.

This research uses numerical simulation by integrating RDM, RBMw, and finite element analysis using PLAXIS 2D. RDM is used to estimate the spatial distribution of roots at various growth stages by assuming a uniform azimuthal distribution around the trunk. Root reinforcement is calculated using RBMw, which assumes that root tensile strength is not uniform within a diameter class, allowing for progressive root failure. Then, slope stability analysis is performed using PLAXIS 2D with the Strength Reduction Method (SRM). *Cryptomeria japonica* was selected as a representative shallow-rooted species, considering tree density of 400-3500 trees/ha and soil thickness of 1–2.5 m. The analysis was conducted under static and dynamic conditions with lateral earthquake coefficients (k_h) of 0.1, 0.15, and 0.2 g, representing variations in earthquake intensity from strong to very strong and destructive.

The results showed that trees affect slope stability, either increasing or decreasing it, following a nonlinear response to density. At low densities (400–1500 trees/ha), roots develop and spread widely, while at high densities (2000–3500 trees/ha), their distribution decreases by up to 88.4% because competition and space limitations inhibit the formation of coarse roots (> 2 mm). Based on the analysis results, roots can increase soil cohesion by up to 484.25%, where the highest c_r (48.4 kPa) is produced by a density of 400 trees/ha, while the lowest c_r (0.53 kPa) is produced by a density of 3500 trees/ha. As a result, the slope SF at a soil thickness of 1 m increased by up to 15% (static) and 24% (dynamic). However, at high densities, there was a 98.91% decrease in c_r (compared to a density of 400 trees/ha), which caused a 6% decrease in SF under static and dynamic conditions. For soil thickness >1 m, no increase in SF can be observed due to the increase in soil mass dominating the stability response, thus root reinforcement is ignored. Then, there is a decrease in tree weight by up to 98.5% as tree density increases, from 13.07 kN to 0.2 kN, meaning that high tree density provides a smaller and more evenly distributed load on the slope. Thus, this study indicates that root reinforcement capacity and individual tree weight in slope stability analysis are influenced by tree density. However, the optimal tree density value within the tested density range cannot yet be determined, so further research is needed to obtain a more definite relationship.

Keywords: Root distribution, root reinforcement, tree weight, tree density, slope stability