

Kaedah penilaian kekuatan tensil akar tanaman menggunakan tolok daya tarik-tolak untuk kawalan hakisan

(Assessment method of plant root tensile strength using a push-pull gauge meter for erosion control)

Intan Nadhirah Masri, Noor Haslizawati Abu Bakar, Mohamad Nasrol Rabidi, Amirul Mukmin Khairul Anuar dan Siti Khadijah Mahadi

Kata kunci: bio-kejuruteraan cerun, kawalan hakisan, kekuatan tensil akar, pemuliharaan tanah, tanaman penutup bumi, tolok daya tarik-tolak

Pengenalan

Hakisan tanah dan aliran permukaan masih merupakan cabaran utama dalam landskap pertanian di kawasan cerun, khususnya di kawasan tanah tinggi tropika yang menerima hujan lebat, mempunyai topografi curam serta mengalami gangguan tanah yang kerap. Keadaan ini mempercepatkan kehilangan lapisan tanah atas dan degradasi tanah. Di Malaysia, sistem pertanian tanah tinggi amat terdedah kepada hakisan yang seterusnya menyebabkan penurunan kesuburan tanah, pengurangan hasil tanaman, pемendapan kelodak di saluran air serta peningkatan kos pengurusan ladang.

Kaedah penyelesaian secara kejuruteraan konvensional seperti pembinaan longkang konkrit, tembok penahan dan teres keras sememangnya berkesan dalam mengawal hakisan, namun kaedah ini sering melibatkan kos yang tinggi, berisiko mengganggu alam sekitar dan kurang sesuai untuk sistem pertanian pekebun kecil.

Selain penyelesaian secara kejuruteraan konvensional untuk kawalan hakisan tanah, terdapat kaedah alternatif iaitu kaedah kejuruteraan bio untuk pengukuhan tanah. Konsep kejuruteraan bio dalam kawalan hakisan tanah menggunakan elemen biologi iaitu penggunaan tumbuhan untuk menstabilkan cerun dan mencegah hakisan. Kejuruteraan konvensional menggunakan simen atau batu semata-mata, manakala kejuruteraan bio menggunakan kekuatan akar sebagai 'tetulang konkrit' untuk memegang tanah. Dalam konteks sifat akar tumbuhan, kekuatan tensil akar (*root tensile strength*) sering digunakan sebagai petunjuk kepada keupayaan mekanikal akar dalam mengukuhkan tanah. Manakala, ketumpatan panjang akar [*root length density* (RLD)] merujuk kepada jumlah panjang akar per unit isi padu tanah dan berfungsi sebagai penunjuk utama keupayaan tumbuhan meneroka tanah untuk mendapatkan air dan nutrien. Parameter ini turut digunakan untuk menilai toleransi kemarau, kadar pertumbuhan akar serta kecekapan amalan pengurusan pertanian. Kedua-dua parameter ini saling melengkapi dalam menentukan potensi sebenar tumbuhan untuk meningkatkan kohesi tanah dan menstabilkan cerun.

Justeru, kajian ini dijalankan bagi menumpukan kepada kaedah penilaian kekuatan tensil akar menggunakan alat tolok daya tarik-tolak dengan penekanan terhadap prosedur pengukuran serta potensi aplikasinya dalam menilai keupayaan tumbuhan untuk menstabilkan cerun dan mengawal hakisan tanah.

Kaedah pengujian kekuatan tensil akar

Teknik aplikasi yang sesuai (berdasarkan hasil kajian)

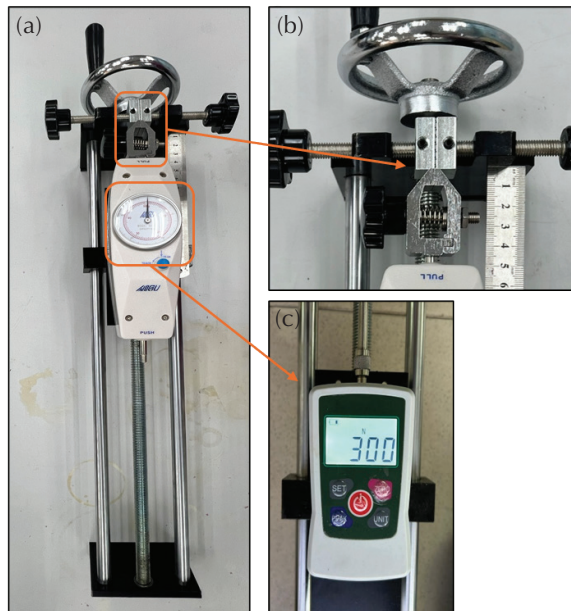
Kaedah ujian kekuatan tensil akar menggunakan alat tolok daya tarik-tolak didapati sesuai untuk menilai sifat mekanikal akar secara langsung dan pantas. Teknik ini membolehkan pengukuran daya putus akar dalam keadaan segar, sekali gus memberikan gambaran yang lebih realistik terhadap keupayaan akar menahan daya tarikan di dalam tanah. Berdasarkan hasil kajian terdahulu, kaedah ini sesuai digunakan untuk membandingkan kekuatan mekanikal akar antara spesies tanaman, khususnya bagi tujuan pemilihan tumbuhan untuk kawalan hakisan dan penstabilan cerun.

Radas ujian kekuatan tensil akar

Ujian kekuatan tensil akar dijalankan menggunakan satu set angka Ujian Tolok Daya Mendatar Berengkol Manual (*Hand-Cranked Horizontal Force Gauge Test Stand*) yang dilengkapi dengan Tolok Daya Tarik-Tolak (*Push-Pull Gauge Meter*) berkapasiti maksimum 300 N (30 kg). Sistem ini menggunakan mekanisme rak berpilin (*spiral rack*) yang membolehkan daya tarikan dikenakan secara terkawal melalui putaran pemegang manual.

Alat ini terdiri daripada tiga komponen utama:

1. Rangka Ujian Dengan Engkol Manual (*hand-cranked test stand*) [*Gambar 1(a)*]
Struktur logam ini menyediakan sokongan mekanikal yang stabil bagi memastikan daya tarikan dikenakan secara mendatar dan selari dengan paksi akar. Putaran pemegang tangan membolehkan pergerakan beransur-ansur dan terkawal semasa ujian dijalankan.
2. Sistem pengapit (*clamp*) bersalut getah [*Gambar 1(b)*]
Akar dipegang menggunakan dua pasang pengapit logam yang dilapik dengan bahan getah. Lapisan getah ini berfungsi untuk:
 - a) Mengurangkan gelinciran akar semasa ujian
 - b) Mengelakkan kerosakan mekanikal pada tisu akar
 - c) Memastikan daya tarikan diagihkan secara sekata
3. Tolok Daya Tarik-Tolak versi digital [*Gambar 1(c)*]
Meter ini digunakan untuk merekodkan daya maksimum (N) yang dikenakan sebelum akar putus. Model yang digunakan boleh terdiri daripada versi analog atau digital dan dipasang secara tetap pada rangka *test stand* bagi memastikan bacaan daya yang tepat dan konsisten.



Gambar 1. (a) Set rangka ujian dengan engkol manual dilengkapi tolok daya tarik-tolak analog, (b) Sistem pengapit (clamp) dan (c) Paparan tolok daya tarik-tolak digital AMF-300 memiliki julat pengukuran 0-300 N ($\approx 0 - 30$ kg)

Segmen akar dipasang di antara dua pengapit dengan satu hujung disambungkan kepada tolok dan satu lagi dipegang oleh struktur statik. Daya tarikan dikenakan secara beransur-ansur sehingga berlaku kegagalan (putus) pada akar dan nilai daya maksimum direkodkan.

Walaupun prinsip operasinya adalah serupa dengan mesin ujian tensil universal (*universal tensile testing machine*), radas ini bersaiz lebih kecil, mudah alih dan lebih sesuai untuk ujian akar tanaman muda berumur 1 – 3 bulan. Reka bentuknya yang ringkas serta kos yang lebih rendah menjadikannya sesuai untuk kegunaan di makmal kecil, tapak semeaian dan juga di plot-plot kajian di lapangan.

Pemilihan segmen akar dan prosedur pengujian

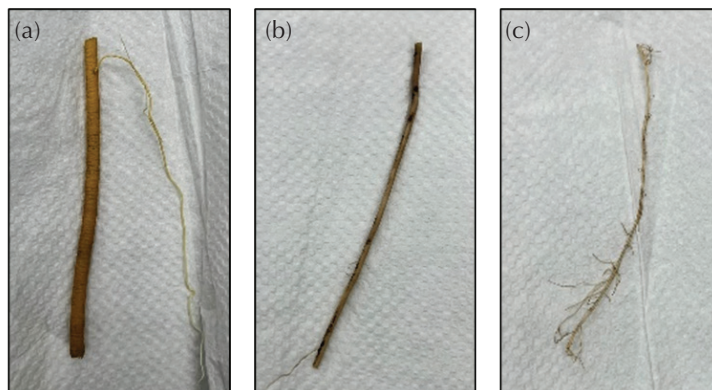
Segmen akar yang dipilih hendaklah lurus, tidak bercabang dan bebas daripada kerosakan fizikal bagi memastikan taburan tegasan yang sekata semasa pengujian. Segmen yang rosak atau menunjukkan kegagalan pada bahagian pengapit tidak direkodkan kerana tidak mewakili kegagalan tensil sebenar. Spesies yang terlibat dalam ujian yang dijalankan ialah *Hemerocallis minor* (kimcham), *Diplazium esculentum* (paku pakis), *Chrysopogon zizanioides* (rumput vetiver), *Cymbopogon citratus* (serai), *Lycium chinense* (goji berry), *Sauropus androgynus* (pucuk manis), *Pandanus amaryllifolius* (pandan) dan *Piper sarmentosum* (kaduk). Sifat morfologi asas sistem akar tanaman terpilih adalah seperti dalam *Jadual 1*. Gabungan data mekanikal dan morfologi ini memberikan gambaran yang lebih menyeluruh terhadap

potensi pengukuhan tanah, kerana keupayaan sebenar dalam kawalan hakisan bergantung kepada kombinasi kekuatan individu akar dan ketumpatan serta taburan sistem akar dalam tanah.

Jadual 1. Morfologi asas sistem akar lapan spesies tanaman

Spesies tanaman ujian	Jumlah panjang akar (cm)	RLD
<i>H. minor</i>	4386.79	3.25
<i>D. esculentum</i>	6350.50	4.70
<i>C. zizanioides</i>	4234.83	3.14
<i>C. citratus</i>	2805.56	2.08
<i>L. chinense</i>	1244.22	0.92
<i>S. androgynus</i>	3635.43	2.70
<i>P. amaryllifolius</i>	7722.03	6.05
<i>P. sarmentosum</i>	600.38	0.47

Nota: Data jumlah panjang akar diperolehi daripada analisis imej akar oleh perisian WinRhizo



Gambar 2. Contoh segmen akar yang dipilih untuk ujian

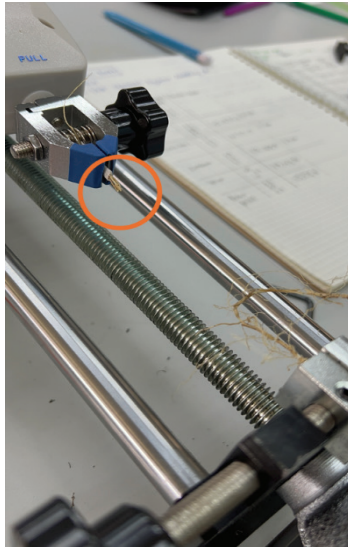
Hanya akar segar digunakan dan diuji seurus selepas pencucian bagi mengekalkan kandungan kelembapan semula jadi. Kandungan air dalam tisu akar mempengaruhi sifat mekanikal seperti keanjalan dan kekuatan tensil; akar yang kehilangan kelembapan boleh menjadi rapuh dan menunjukkan perubahan sifat mekanikal.

Bagi setiap spesies tanaman, enam segmen akar sepanjang kira-kira 10 cm dipilih untuk ujian. Beban tarikan dikenakan secara beransur-ansur melalui putaran engkol manual pada kadar purata kira-kira 43 putaran seminit ($\approx 870 \text{ mm min}^{-1}$) sehingga berlaku kegagalan akar. Nilai daya tertinggi yang direkodkan sebaik sahaja akar putus diambil sebagai daya putus bagi setiap sampel. Kaedah pengenaan beban secara manual ini selari dengan pendekatan ujian lapangan dan saringan awal yang lazim digunakan dalam kajian kekuatan tensil akar

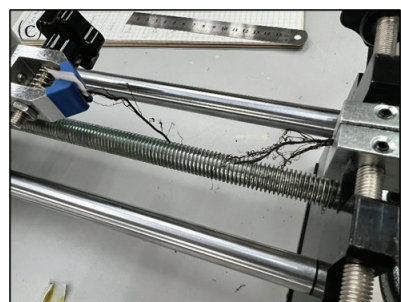
menggunakan peralatan mudah alih. Diameter akar diukur sebelum pengujian dan nilai kekuatan tensil (σ , MPa) dikira menggunakan persamaan yang berikut:

$$\sigma = \frac{4F}{\pi d^2}$$

di mana F ialah nilai daya tertinggi sebelum putus dan d ialah diameter purata akar.



Gambar 3. Contoh kegagalan pada bahagian pengapit yang tidak direkodkan



Gambar 4. (a) Sampel akar tanaman paku pakis selepas dicuci, (b) Segmen akar paku pakis yang telah siap dipotong sepanjang 10 cm dan (c) Segmen akar paku pakis yang telah selesai diuji di mana kegagalan berlaku pada bahagian tengah

Sifat mekanikal akar dan potensi pengukuhan tanah

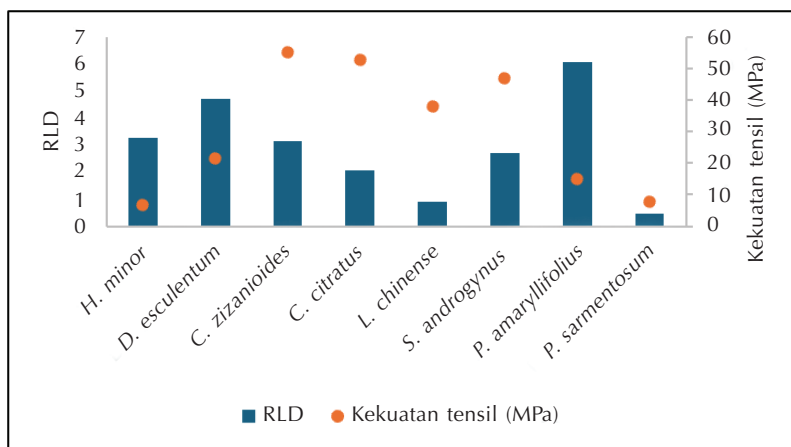
Perbezaan sifat mekanikal akar antara spesies tanaman yang diuji adalah jelas (*Jadual 2*). Spesies berdiameter akar lebih besar seperti *H. minor* menunjukkan daya putus yang tinggi, tetapi kekuatan tensil yang rendah. Sebaliknya, spesies berakar lebih halus seperti *C. zizanioides* dan *C. citratus* merekodkan kekuatan tensil yang jauh lebih tinggi walaupun daya putusnya sederhana. Corak ini menunjukkan hubungan songsang antara diameter akar dan kekuatan tensil, selaras dengan konsep fungsi kuasa (*power-law*) dalam biomekanik akar.

Walau bagaimanapun, keupayaan sebenar dalam pengukuhan tanah tidak hanya bergantung kepada kekuatan individu akar. Data morfologi (*Jadual 1*) menunjukkan variasi ketara dalam RLD, yang menggambarkan kepadatan sistem akar dalam tanah. Apabila nilai RLD dibandingkan dengan kekuatan tensil bagi setiap spesies (*Rajah 1*), jelas bahawa potensi pengukuhan tanah adalah hasil gabungan kedua-dua parameter tersebut.

Jadual 2. Perbandingan diameter akar dan kekuatan tensil lapan spesies tanaman terpilih bagi kajian potensi tanaman sebagai penstabil cerun

Spesies tanaman ujian	Purata diameter akar (mm)	Purata daya (N)	Purata kekuatan tensil (MPa)
<i>H. minor</i>	3.73 ± 0.48	71.12 ± 10.05	6.68 ± 0.62
<i>D. esculentum</i>	1.00 ± 0.38	14.72 ± 4.65	21.53 ± 6.00
<i>C. zizanioides</i>	1.14 ± 0.26	52.73 ± 21.53	55.10 ± 10.91
<i>C. citratus</i>	0.78 ± 0.15	24.53 ± 6.01	52.83 ± 5.49
<i>L. chinense</i>	0.73 ± 0.32	18.39 ± 17.25	37.99 ± 3.43
<i>S. androgynus</i>	0.57 ± 0.12	9.81 ± 3.80	46.78 ± 13.54
<i>P. amaryllifolius</i>	1.32 ± 0.44	5.78 ± 2.43	15.02 ± 12.10
<i>P. sarmentosum</i>	0.97 ± 0.34	4.38 ± 2.81	7.72 ± 9.77

Nota: Nilai purata dilaporkan bersama nilai sisihan piawai bagi sampel



Rajah 1. Perbandingan parameter morfologi (RLD) dan mekanikal (kekuatan tensil, MPa) akar bagi lapan spesies tanaman terpilih untuk penilaian potensi penstabilan cerun

Sebagai contoh, *C. zizanioides* menunjukkan kombinasi kekuatan tensil tinggi dan RLD sederhana, manakala *P. amaryllifolius* mempunyai RLD tertinggi tetapi kekuatan tensil sederhana. Sebaliknya, *L. chinense* dan *P. sarmentosum* menunjukkan kedua-dua nilai yang rendah, mencadangkan potensi pengukuhan tanah yang lebih terhad. Dapatan ini menunjukkan bahawa spesies dengan sistem akar halus dan padat berpotensi memberikan pengukuhan tanah permukaan yang lebih berkesan berbanding dengan spesies berakar kasar tetapi jarang. Oleh itu, penilaian kekuatan tensil perlu ditafsir bersama dengan parameter morfologi seperti RLD bagi mendapatkan gambaran yang lebih realistik terhadap potensi kawalan hakisan.

Kesimpulan

Kajian ini menunjukkan bahawa ujian kekuatan tensil akar menggunakan tolok daya tarik-tolak merupakan kaedah yang praktikal, kos rendah dan sesuai untuk menilai sifat mekanikal akar tanaman. Penggunaan radas ini membolehkan pengguna menilai kekuatan mekanikal akar secara pantas ketika di lapangan, seterusnya membantu pemilihan spesies tanaman yang lebih sesuai untuk kawalan hakisan dan penstabilan cerun berdasarkan bukti mekanikal, bukan sekadar pemerhatian visual. Keputusan kajian membuktikan bahawa spesies berakar serabut seperti *C. zizanioides* dan *C. citratus* mempunyai kekuatan tensil yang lebih tinggi berbanding dengan spesies berakar kasar, sekali gus menunjukkan potensi yang lebih baik dalam pengukuhan tanah dan kawalan hakisan permukaan. Dapatan kajian ini berpotensi diaplikasikan di ladang sayuran di kawasan bercerun, khususnya bagi pemilihan tanaman penutup bumi, tanaman penstabil cerun atau tanaman dwifungsi yang dapat mengurangkan hakisan sambil menjana pendapatan. Walau bagaimanapun, kekuatan tensil sahaja tidak mencukupi untuk menggambarkan sepenuhnya keberkesanan tumbuhan dalam menstabilkan cerun kerana faktor lain seperti ketumpatan akar, taburan ruang dan seni bina sistem akar turut memainkan peranan penting. Oleh itu, penilaian kekuatan tensil perlu digabungkan dengan analisis reka bentuk sistem akar bagi menghasilkan pemilihan spesies tanaman yang lebih tepat dan berkesan untuk tujuan pemuliharaan tanah. Turut perlu dipertimbangkan bahawa saiz sampel yang digunakan dalam kajian ini adalah terhad ($n = 6$) dan bertujuan sebagai saringan awal. Oleh itu, kajian lanjutan dengan bilangan sampel yang lebih besar disarankan bagi memperoleh data kejuruteraan yang lebih mantap serta lebih mewakili keadaan sebenar di lapangan.

Bibliografi

- Aznan, M. E., Ali Rahman, Z., Tarmidzi, S. N. A., Idris, W. M. R., Lihan, T., Kadir, A. A., Jalil, N. A. A., & Jasni, Z. (2025). Growth performance, root tensile resistance, and shear strength characteristics of root-permeated soil of selected shrub species. *Journal of Tropical Forest Science*, 37(2), 180–198.
- Beck, D. L., Darrah, L. L., & Zuber, M. S. (1988). Relationship of root tensile strength to vertical root pulling resistance in maize. *Crop Science*, 28(3), 571–573.
- Bischetti, G. B., Chiaradia, E. A., Epis, T., & Morlotti, E. (2009). Root cohesion of forest species in the Italian Alps. *Plant and Soil*, 324(1–2), 71–89.
- Bengough, A. G., Brown, J. L., Loades, K. W., Knappett, J. A., Meijer, G., & Nicoll, B. C. (2016). Understanding plant root system influences on soil strength and stability. *Geophysical Research Abstracts*, 18, EGU2016-15457.
- De Baets, S., Poesen, J., Reubens, B., Wemans, K., De Baerdemaeker, J., & Muys, B. (2008). Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. *Plant and Soil*, 305, 207–226.
- Dorairaj, D., & Osman, N. (2021). Present practices and emerging opportunities in bioengineering for slope stabilization in Malaysia. *PeerJ*, 9, e10477.
- Ettbeb, A., Burylo, M., Rey, F., & Mathys, N. (2020). Root tensile resistance of selected *Pennisetum* species and implications for soil bioengineering. *Applied and Environmental Soil Science*, 2020.
- Ford, H., Garbutt, A., Jones, L., & Jones, D. L. (2016). Soil stabilization linked to plant diversity and environmental context in coastal wetlands. *Journal of Vegetation Science*, 27(2), 259–271.
- Gilardelli, F., Vergani, C., Chiaradia, E. A., & Bischetti, G. B. (2017). Root characteristics of herbaceous species for topsoil stabilization in restoration projects. *Land Degradation & Development*, 28(6), 2074–2085.
- Hishi, T. (2007). Heterogeneity of individual roots within the fine root architecture: Causal links between physiological and ecosystem functions. *Journal of Forest Research*, 12(2), 126–133.
- Mairaing, W., Soralump, S., & Tantasirin, C. (2024). A biomechanical study of potential plants for erosion control and slope stabilization in highland areas of Thailand. *Sustainability*, 2024, 16, 6374.
- Mao, Z., Roumet, C., Rossi, L. M. W., Merino-Martín, L., Nespoulous, J., Taugourdeau, O., Boukcim, H., Fournier, S., Del Rey Granado, M., Ramel, M., Ji, K., Zuo, J., Fromin, N., Stokes, A., & Fort, F. (2023). Intra- and inter-specific variation in root mechanical traits for twelve herbaceous plants and their link with the root economics space. *Oikos*, 2023(1), e09032.
- Masi, E. B., Segoni, S., Tofani, V., & Catani, F. (2021). Root reinforcement in slope stability modelling: A review. *Geosciences*, 2021, 11, 212.
- Mehtab, A., Jiang, Y.-J., Su, L.-J., Shamsheer, S., Li, J.-J., & Mahfuzur, R. (2021). Scaling the roots mechanical reinforcement in plantation of *Cunninghamia* R. Br in Southwest China. *Forests*, 12(1), 33.

- Meng, S., Zhao, G., & Yang, Y. (2020). Impact of plant root morphology on rooted-soil shear resistance using triaxial testing. *Advances in Civil Engineering, 2020*, Article 8825828.
- Normaniza, O., Abdullah, M. N., & Abdullah, C. H. (2011). Pull-out and tensile strength properties of two selected tropical trees. *Sains Malaysiana, 40*(6), 577–585.
- Stokes, A., Norris, J. E., van Beek, L. P. H., Bogaard, T., Cammeraat, E., Mickovski, S. B., Jenner, A., Di Iorio, A., & Fourcaud, T. (2009). How vegetation reinforces soil on slopes. In A. Stokes, C. Spanos, J. E. Norris, & L. P. H. van Beek (Eds.), *Slope stability and erosion control: Ecotechnological solutions* (m.s. 65–118). Springer.

Ringkasan

Hakisan tanah di kawasan pertanian bercerun merupakan masalah serius yang menjejaskan kesuburan tanah, produktiviti tanaman dan kualiti alam sekitar. Penggunaan tumbuhan sebagai agen bio-kejuruteraan semakin mendapat perhatian kerana akar tanaman mampu mengukuhkan struktur tanah secara semula jadi. Salah satu parameter penting dalam menilai potensi ini adalah kekuatan tensil akar iaitu keupayaan akar menahan daya tarikan sebelum putus. Artikel ini menumpukan kepada kaedah penilaian kekuatan tensil akar menggunakan tolok daya tarik-tolak sebagai teknik yang praktikal dan kos efektif. Ujian dijalankan ke atas beberapa spesies tanaman yang ditanam dalam rhizobox selama 90 hari. Segmen akar segar yang lurus dan tidak rosak dipilih, dipasang pada sistem pengapit bersalut getah dan dikenakan daya tarikan secara beransur-ansur sehingga berlaku kegagalan. Nilai daya maksimum direkodkan dan kekuatan tensil dikira berdasarkan diameter akar. Keputusan menunjukkan perbezaan ketara antara spesies, di mana tanaman berakar serabut seperti *Chrysopogon zizanioides* dan *Cymbopogon citratus* mempunyai kekuatan tensil yang lebih tinggi berbanding dengan spesies berakar kasar. Dapatan ini mengesahkan bahawa akar halus lebih berkesan dalam pengukuhan tanah permukaan. Walau bagaimanapun, kekuatan tensil sahaja tidak mencukupi untuk meramal keberkesanan kawalan hakisan tanpa mengambil kira reka bentuk sistem akar dan taburannya dalam tanah. Ketumpatan panjang akar (RLD) turut mempengaruhi tahap pengukuhan tanah kerana ia menentukan sejauh mana sistem akar memenuhi dan berinteraksi dengan matriks tanah. Secara keseluruhan, kaedah tolok daya tarik-tolak sesuai digunakan sebagai alat penilaian awal bagi pemilihan spesies tanaman untuk tujuan kawalan hakisan dan penstabilan cerun.

Summary

Soil erosion on sloping agricultural land remains a major environmental concern, leading to reduced soil fertility, reduced crop productivity and sedimentation of waterways. The use of vegetation for soil bioengineering has gained attention because plant roots can naturally reinforce soil structure. Root tensile strength is a key parameter used to assess the mechanical resistance of roots against pulling forces. This article focuses on the assessment of root tensile strength using a push-pull force meter as a practical and cost-effective method. Several plant species were grown in rhizoboxes for 90 days, and fresh, straight, undamaged root segments were selected for testing. The roots were clamped using rubber-coated grips and subjected to axial tensile loading until rupture occurred. The maximum breaking force was recorded, and tensile strength was calculated based on root diameter. The results showed clear interspecific differences in root mechanical properties.

Fibrous-rooted species such as *Chrysopogon zizanioides* and *Cymbopogon citratus* exhibited higher tensile strength compared to coarse-rooted species. This confirms that fine roots are more effective in reinforcing surface soil layers. However, tensile strength alone is insufficient to fully predict erosion control performance, as root distribution, density and architectural traits also influence soil reinforcement. Root length density (RLD) also plays a critical role, as it reflects the extent of root distribution within the soil matrix and contributes to overall soil reinforcement capacity. Overall, the push-pull force meter provides a reliable and low-cost approach for preliminary evaluation of plant species suitability for erosion control and slope stabilization, particularly for young plants under controlled conditions.

Pengarang

Intan Nadhirah Masri

Pusat Penyelidikan Sains Tanah, Air dan Baja,

Ibu Pejabat MARDI, Persiaran MARDI-UPM, 43400 Serdang, Selangor

E-mel: intannadhirah@mardi.gov.my

Noor Haslizawati Abu Bakar dan Siti Khadijah Mahadi

Pusat Penyelidikan Sains Tanah, Air dan Baja,

MARDI Cameron Highlands, 39007 Tanah Rata, Pahang

Mohamad Nasrol Rabidi dan Amirul Mukmin Khairul Anuar

Pusat Penyelidikan Sains Tanah, Air dan Baja,

Ibu Pejabat MARDI, Persiaran MARDI-UPM, 43400 Serdang, Selangor