

BAB I PENDAHULUAN UMUM

1.1 Latar Belakang

Tanah merupakan sumber daya alam yang tidak dapat diperbarui dan memiliki peran krusial dalam menopang kehidupan di Bumi, terutama dalam mendukung sekitar 95% produksi pangan global (Ferreira et al., 2022). Keberlanjutan fungsi tanah sangat penting untuk menjamin ketahanan pangan dan kelestarian lingkungan. Berbagai aktivitas manusia yang tidak ramah lingkungan telah menyebabkan terjadinya degradasi tanah, yaitu penurunan atau hilangnya fungsi tanah secara biotik maupun abiotik. Degradasi tanah diklasifikasikan ke dalam empat jenis utama, yaitu degradasi fisik, kimia, biologis, dan ekologis (Lal et al., 2020). Masing-masing jenis degradasi berdampak langsung terhadap produktivitas tanah dan keseimbangan ekosistem. Salah satu penyebab utama degradasi tanah adalah praktik pengelolaan lahan yang keliru, seperti penggunaan lahan yang tidak sesuai, intensifikasi pertanian yang berlebihan, serta pengabaian terhadap praktik konservasi tanah (Chalise et al., 2019). Tanpa penanganan yang tepat, degradasi tanah berpotensi mengancam keberlanjutan sistem produksi pertanian dan mempercepat kerusakan lingkungan secara luas.

Bendungan merupakan infrastruktur vital yang berfungsi menahan air dan memberikan berbagai manfaat seperti pengendalian banjir, penyediaan irigasi, pembangkit tenaga air, pasokan air baku, dan rekreasi, sehingga berkontribusi pada pembangunan serta kesejahteraan sosial ekonomi masyarakat (Bhagat, 2021). Bendungan Napun Gete adalah satu-satunya bendungan di Pulau Flores, terletak di Desa Ilinmedo, Kecamatan Waiblama, Kabupaten Sikka, Provinsi Nusa Tenggara Timur, dan diresmikan pada awal tahun 2021. Luas bendungan mencapai 160 ha dengan tampungan air seluas 99,78 ha dan kapasitas 11,22 juta m³. Pemanfaatannya meliputi suplai air baku (214 m³/detik), irigasi (300 ha), pembangkit listrik (0,71 MW), serta pariwisata (PUPR, 2021). Dari aspek hidrologis, bendungan ini berada di wilayah DAS Nebe dengan luas 23.786,17 ha. Daerah hulu mencakup 3.223,21 ha yang meliputi Desa Natarmage, Tanarawa, dan Tua Bao. Penggunaan lahan di wilayah hulu cukup beragam, didominasi oleh tanaman tahunan seperti kakao, jambu mete, kemiri, dan kayu-kayuan, serta tanaman pangan, terutama padi gogo sebagai komoditas utama. Tanaman sela seperti jagung dan kacang-kacangan

juga dibudidayakan. Data dari Balai Penyuluh Pertanian Kecamatan Waiblama menunjukkan bahwa luas tanam padi gogo mencapai 328 ha di Desa Tanarawa dan 340 ha di Desa Natarmage atau total 20,73% dari luas wilayah hulu Bendungan Napun Gete, dengan varietas yang umum ditanam antara lain Ciherang, Lokal Merah, dan Lokal Hitam.

Keberlanjutan fungsi Bendungan Napun Gete sangat dipengaruhi oleh kondisi daerah aliran sungai (DAS) di wilayah hulu, khususnya terkait potensi erosi dan sedimentasi. Berdasarkan hasil studi pendahuluan mengenai prediksi erosi, diketahui bahwa wilayah hulu DAS Bendungan Napun Gete dengan luas 3.223,21 hektar memiliki tingkat erosi yang bervariasi, mulai dari 0,05 hingga 1.749,42 ton/ha/tahun. Rentang ini mencerminkan kategori erosi dari sangat ringan hingga sangat berat, dengan nilai rata-rata erosi sebesar 406,26 ton/ha/tahun. Jika dikonversikan menggunakan berat jenis sedimen 1,3 ton/m³, maka nilai ini setara dengan volume sedimen tahunan sebesar 312,51 m³/ha/tahun. Berdasarkan data studi kelayakan, Bendungan Napun Gete memiliki kapasitas tampungan mati untuk sedimen (*dead storage sediment/DSS*) sebesar 4.400.000 m³, yang diperuntukkan bagi masa operasi selama 50 tahun (Indrakarya, 2013). Dengan demikian, kapasitas DSS per hektar DAS adalah 1.364,72 m³/ha atau setara dengan 27,29 m³/ha/tahun. Perbandingan antara nilai rata-rata volume sedimen tahunan (312,51 m³/ha/tahun) dengan DSS tahunan menunjukkan bahwa laju sedimentasi yang masuk ke dalam bendungan jauh melampaui kapasitas yang direncanakan, yakni sekitar sebelas kali lipat. Apabila kondisi ini terus berlangsung tanpa adanya upaya pengendalian, maka pendangkalan waduk akan terjadi lebih cepat dari umur rencana, yang pada akhirnya akan berdampak pada penurunan kapasitas tampung dan fungsi operasional bendungan secara keseluruhan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan konservasi yang efektif untuk menekan laju erosi dan memperpanjang umur layanan bendungan.

Menurut Lal et al. (2020), penanganan degradasi tanah memerlukan tindakan rehabilitasi, resiliensi, dan konservasi tanah. Konservasi tanah bertujuan mencegah dan memperbaiki kerusakan tanah, memulihkan kesuburan, menjaga produktivitas, serta mendukung keberlanjutan penggunaan lahan (Diop et al., 2022). Metode konservasi yang umum meliputi pendekatan vegetatif, fisik-mekanik, dan kimiawi (Blanco & Lal, 2008), namun pendekatan biologis seperti pemanfaatan mikroorganisme tanah masih belum dioptimalkan (Jafarpour et al., 2022).

Gharemahmudli et al. (2021) mengemukakan bahwa penggunaan mikroorganisme lokal, seperti cyanobacteria, merupakan teknik konservasi baru yang efektif dalam pengelolaan sumber daya tanah dan air. Inokulasi cyanobacteria terbukti mampu menurunkan limpasan hingga 73%, meningkatkan waktu menuju debit puncak sebesar 56%, serta mengurangi konsentrasi sedimen dan kehilangan tanah masing-masing sebesar 78% dan 89%. Penelitian lain oleh Khirvam (2018) menunjukkan bahwa cyanobacteria mampu menurunkan kehilangan tanah dan air hingga 96–99%, menjadikannya strategi inovatif dalam biokonservasi dan reklamasi lahan. Cyanobacteria bekerja melalui mekanisme biologis seperti produksi polisakarida, eksopolisakarida, dan elastisitas seluler yang mengikat partikel tanah, pembentukan jaringan filamen yang memperkuat agregat tanah, peningkatan bahan organik, stabilisasi karbon organik, serta fiksasi nitrogen bebas yang memperbaiki kesuburan tanah. Mengingat masih terbatasnya penelitian terkait biokonservasi tanah dan air, studi literatur ini dapat menjadi dasar untuk mengkaji potensi mikroorganisme tanah lain yang memiliki fungsi serupa.

Hasil kajian pendahuluan menunjukkan bahwa mikoriza memiliki potensi sebagai agen pembenah tanah dalam mendukung pertanian berkelanjutan (Jeksen, 2023). CMA juga berkontribusi dalam mitigasi degradasi tanah (Singh et al., 2022). Mikoriza melalui sekresi senyawa polisakarida menghasilkan asam organik yang dimanfaatkan oleh hifa eksternal untuk mengikat butir primer tanah menjadi agregat mikro, kemudian membentuk agregat makro yang stabil (Lehmann et al., 2017). Kombinasi antara mikoriza dan alga terbukti efektif dalam meningkatkan pembentukan agregat tanah (Al-Maliki & Ebreesum, 2020). Mikoriza juga memproduksi glomalin, yaitu protein tanah yang berperan penting dalam meningkatkan stabilitas agregat tanah (Gao et al., 2019). Glomalin yang dihasilkan CMA turut berkontribusi dalam mitigasi degradasi tanah melalui fungsinya sebagai substrat mikroba, agen perekat agregat, pengkhelat logam berat dan polutan toksik, serta meningkatkan penyerapan karbon jangka panjang dalam tanah (Singh et al., 2022). Secara menyeluruh, glomalin memainkan peran penting dalam memperbaiki sifat fisik tanah, meningkatkan kandungan nutrisi dan aktivitas mikroba, menstabilkan polutan, serta mendukung proses pemulihan ekologi.

Aktivitas CMA di daerah rizosfer dan mikorizosfer berperan penting dalam memperbaiki kondisi fisik, kimia, dan biologi tanah, menciptakan lingkungan yang sehat bagi pertumbuhan tanaman (Tang et al., 2024). Kontribusi CMA terhadap

peningkatan kesuburan tanah dibuktikan oleh Wang et al. (2023), yang melaporkan bahwa pemberian pupuk N dan P sebesar 90 kg ha⁻¹ (40% dari dosis standar) mampu secara signifikan meningkatkan populasi dan keragaman CMA serta hasil tanaman, baik secara langsung maupun melalui perbaikan sifat kimia tanah. Kemampuan CMA dalam meningkatkan serapan fosfor dan hasil tanaman juga lebih tinggi dibandingkan tanpa mikoriza (Wang et al., 2020). Kehadiran CMA terbukti secara signifikan mengurangi kehilangan nitrogen dan fosfor dari tanah, menjaga ketersediaan hara, dan mendukung keberlanjutan ekosistem tanah (Qiu et al., 2022). Keanekaragaman CMA dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti jenis penggunaan lahan, sistem pertanian, pengolahan tanah, pemupukan, serta kedalaman tanah. Kepadatan spora dan keragaman spesies CMA cenderung lebih tinggi pada tanah bagian atas di sistem tanpa olah tanah (Solís-Rodríguez et al., 2020). Faktor kemiringan lereng juga berperan dalam menentukan keragaman CMA, sebagaimana dijelaskan oleh Casazza et al. (2017). Perkembangan mikoriza turut dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti pH, suhu, dan kelembapan tanah (Gehring, 2017).

Mikoriza komersial yang beredar di pasaran umumnya berasal dari hasil isolasi di wilayah tertentu, sehingga efektivitasnya cenderung menurun saat diaplikasikan di lingkungan berbeda akibat kebutuhan waktu adaptasi terhadap kondisi lokal. Temuan Silva-Castro et al. (2022) menunjukkan bahwa CMA indigenous lebih efektif dalam memulihkan tanah yang terkontaminasi logam berat dibandingkan dengan CMA non-indigenous. Kajian terhadap potensi CMA yang berasal dari wilayah lokal sebagai agen Biokonservasi menjadi hal yang penting. Penelitian mengenai pemanfaatan CMA lokal sebagai agen Biokonservasi di wilayah hulu Bendungan Napun Gete, Flores, Nusa Tenggara Timur, menjadi relevan dan diperlukan untuk mendukung upaya konservasi tanah serta berkontribusi langsung terhadap keberlanjutan fungsi bendungan sebagai sumber air irigasi, air baku, dan energi. Upaya ini menjadi strategi penting dalam menjaga kelestarian daya dukung lahan dan sistem pertanian di kawasan tangkapan air, sehingga menjamin keberlanjutan pemanfaatan Bendungan Napun Gete dalam jangka panjang.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimanakah species, populasi dan kelimpahan CMA pada wilayah hulu Bendungan Napun Gete?
2. Bagaimanakah pengaruh CMA terhadap sifat fisik dan kimia tanah?
3. Bagaimanakah analisis perbandingan kelayakan usahatani padi gogo yang menggunakan CMA dengan yang tidak menggunakan CMA?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Menganalisis species, populasi dan kelimpahan CMA pada wilayah hulu Bendungan Napun Gete.
2. Menganalisis pengaruh CMA terhadap sifat fisik dan kimia tanah.
3. Menganalisis perbandingan kelayakan usahatani padi gogo yang menggunakan CMA dengan yang tidak menggunakan CMA.

1.4 Kegunaan Penelitian

1. Sebagai sumber informasi awal tentang species dan populasi serta kelimpahan CMA pada wilayah hulu Bendungan Napun Gete.
2. Sebagai sebuah model pelaksanaan konservasi tanah pada wilayah hulu sebuah bendungan menggunakan metode konservasi tanah secara hayati atau Biokonservasi tanah
3. Sebagai bahan pertimbangan oleh pengambil kebijakan dalam penerapan konservasi tanah.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

1. Tahap pertama, isolasi CMA pada wilayah hulu Bendungan Napun Gete kemudian dilakukan identifikasi secara mikroskopik untuk mengetahui jenis, populasi dan kelimpahan.
2. Tahap kedua, CMA yang ditemukan paling dominan pada penelitian tahap pertama diinokulasi pada tanaman jagung, selanjutnya hasil dari inokulasi ini dijadikan inokulum CMA untuk dilakukan uji coba pada tanaman padi gogo.
3. Tahap ketiga, pada tahap ini dilakukan analisis perbandingan kelayakan usahatani padi gogo yang menggunakan CMA dengan yang tidak menggunakan CMA, analisis ini menggunakan hasil penelitian tahap kedua.

1.6 Kebaharuan Penelitian (Novelty)

Kebaharuan dari penelitian ini adalah ditemukan sebuah model pelaksanaan konservasi tanah yaitu metode konservasi tanah secara hayati atau Biokonservasi tanah dengan pemanfaatan CMA sebagai agen Biokonservasi tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Maliki, S., & Ebreesum, H. (2020). Changes in soil carbon mineralization, soil microbes, roots density and soil structure following the application of the arbuscular mycorrhizal fungi and green algae in the arid saline soil. *Rhizosphere*, 14, 100203. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100203>
- Bhagat, S. K. (2021). Dynamics of Making of Large Dam: An overview of Benefits and Challenges. *PRAGYAN A Peer Reviewed Multidisciplinary Journal*, 3(1), 204-214. <https://doi.org/10.3126/pprmj.v3i1.61417>
- Blanco, H., & Lal, R. (2008). *Principles of soil conservation and management* (Vol. 167169). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8709-7>
- Casazza, G., Lumini, E., Ercole, E., Dovana, F., Guerrina, M., Arnulfo, A., Minuto, L., Fusconi, A., & Mucciarelli, M. (2017). The abundance and diversity of arbuscular mycorrhizal fungi are linked to the soil chemistry of screes and to slope in the Alpic paleo-endemic Berardia subacaulis. *PLoS One*, 12(2), e0171866. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171866>
- Chalise, D., Kumar, L., & Kristiansen, P. (2019). Land degradation by soil erosion in Nepal: A review. *Soil systems*, 3(1), 12. <https://doi.org/10.3390/soilsystems3010012>
- Diop, M., Chirinda, N., Beniaich, A., El Gharous, M., & El Mejahed, K. (2022). Soil and water conservation in Africa: State of play and potential role in tackling soil degradation and building soil health in agricultural lands. *Sustainability*, 14(20), 13425. <https://doi.org/10.3390/su142013425>
- Ferreira, C. S., Seifollahi-Aghmiuni, S., Destouni, G., Ghajarnia, N., & Kalantari, Z. (2022). Soil degradation in the European Mediterranean region: Processes, status and consequences. *Science of the Total Environment*, 805, 150106. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150106>
- Gao, W.-Q., Wang, P., & Wu, Q.-S. (2019). Functions and application of glomalin-related soil proteins: a review. *Sains Malaysiana*, 48(1), 111-119. <https://doi.org/10.17576/jsm-2019-4801-13>
- Gehring, C. A. (2017). Introduction: mycorrhizas and soil structure, moisture, and salinity. In *mycorrhizal mediation of soil* (pp. 235-240). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804312-7.00013-9>
- Gharemahmudli, S., Hamidreza Sadeghi, S., & Najafinejad, A. (2021). Functionality of Soil Microorganisms in Bio-conservation of Water and Soil. EGU General Assembly Conference Abstracts, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-16324>.
- Indrakarya, P. T. (2013). *Studi Kelayakan Waduk Napung Gete Di Kabupaten Sikka*. P.T Indra Karya, Kupang, Indonesia. <http://surl.li/rtbrot>

- Jafarpoor, A., Sadeghi, S. H., Darki, B. Z., & Homaei, M. (2022). Changes in morphologic, hydraulic, and hydrodynamic properties of rill erosion due to surface inoculation of endemic soil cyanobacteria. *Catena*, 208, 105782. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105782>
- Jeksen, J., Hazairin Zubair, Asmita Ahmad, A. Nixia Tenriawaru. (2023). Reviewing The Potential Of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (FMA) As Agent Soil Bioconservation The 4th International Seminar on Science and Technology (ISSTEC), Yogyakarta, Indonesia <http://surl.li/kfbhtx>.
- Khirvam, S., Syed Hamidreza. (2018). Mechanisms and Functionality of Cyanobacteria in Bio-conservation of Soil and Water. The 13th National Conference on Watershed Management Science & Engineering of Iran and The 3rd National Conference on Conservation of Natural Resources and Environment, 3-4 October 2018, Ardabil, Iran, Ardabil, Iran.
- Lal, R., Blum, W. E., Valentin, C., & Stewart, B. A. (2020). *Methods for assessment of soil degradation*. CRC press.
- Lehmann, A., Leifheit, E., & Rillig, M. (2017). Mycorrhizas and soil aggregation. In *Mycorrhizal mediation of soil* (pp. 241-262). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804312-7.00014-0>
- PUPR, B. K. P. K. (2021). *Kementerian PUPR: Bendungan Napun Gete, Ketiga Tuntas di NTT*. <https://www.pu.go.id/berita/kementerian-pupr-bendungan-napun-gete-ketiga-tuntas-di-ntt>
- Qiu, Q., Bender, S. F., Mgelwa, A. S., & Hu, Y. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi mitigate soil nitrogen and phosphorus losses: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 807, 150857. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150857>
- Silva-Castro, G. A., Cano, C., Moreno-Morillas, S., Bago, A., & García-Romera, I. (2022). Inoculation of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi as a strategy for the recovery of long-term heavy metal-contaminated soils in a mine-spill area. *Journal of Fungi*, 9(1), 56. <https://doi.org/10.3390/jof9010056>
- Singh, A. K., Zhu, X., Chen, C., Wu, J., Yang, B., Zakari, S., Jiang, X. J., Singh, N., & Liu, W. (2022). The role of glomalin in mitigation of multiple soil degradation problems. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(9), 1604-1638. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1862561>
- Solís-Rodríguez, U. R. J., Ramos-Zapata, J. A., Hernández-Cuevas, L., Salinas-Peba, L., & Guadarrama, P. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi diversity and distribution in tropical low flooding forest in Mexico. *Mycological Progress*, 19(3), 195-204. <https://doi.org/10.1007/s11557-019-01550-x>
- Tang, B., Man, J., Lehmann, A., & Rillig, M. C. (2024). Arbuscular mycorrhizal fungi attenuate negative impact of drought on soil functions. *Global Change Biology*, 30(7), e17409. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcb.17409>

- Wang, X. X., Hoffland, E., Feng, G., & Kuyper, T. W. (2020). Arbuscular mycorrhizal symbiosis increases phosphorus uptake and productivity of mixtures of maize varieties compared to monocultures. *Journal of Applied Ecology*, 57(11), 2203-2211. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13739>
- Wang, Y., Zhang, W., Li, C., Chang, S., Miao, Y., Li, Q., Kou, Z., & Dang, T. (2023). Long-term nitrogen and/or phosphorus additions lead to a shift in the diversity of soil arbuscular mycorrhizal fungi and improve rainfed crop yield on the Chinese Loess Plateau. *Pedosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2023.01.009>

BAB II. SPECIES, POPULASI DAN KELIMPAHAN CENDAWAN MIKORIZA ARBUSKULAR (CMA) PADA WILAYAH HULU BENDUNGAN NAPUN GETE

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi species, populasi dan kelimpahan cendawan mikoriza arbuskular (CMA) di wilayah hulu Bendungan Napun Gete. Sebanyak 78 sampel tanah dikumpulkan berdasarkan 13 unit lahan dan dua kedalaman tanah (0–25 cm dan 25–50 cm), masing-masing dengan tiga ulangan. Hasil identifikasi CMA di kawasan hulu Bendungan Napun Gete menunjukkan keberadaan empat genus dengan 12 spesies, yaitu Genus *Glomus*, *Acaulospora*, *Gigaspora*, dan *Entrophospora*. Spesies yang teridentifikasi antara lain *Glomus etunicatum*, *G. agregatum*, *G. moseae*, *G. intraradices*, *G. rubiformis*, *Acaulospora foveata*, *A. tuberculata*, *A. cf. undulata*, *A. scrobiculata*, *Gigaspora albida*, *G. margarita*, dan *Entrophospora infrequens*. Genus *Glomus* mendominasi populasi dengan proporsi 81,98%, diikuti *Acaulospora* 13,29%, *Gigaspora* 4,68%, dan *Entrophospora* 0,05%. Kelimpahan spora tertinggi rata-rata mencapai 86,5 spora per 100 gram tanah. Temuan ini menunjukkan bahwa kawasan hulu Bendungan Napun Gete memiliki potensi inokulum CMA yang tinggi untuk mendukung Biokonservasi tanah.

Kata kunci: Cendawan mikoriza arbuskular, *Glomus*, Kelimpahan spora, Bendungan Napun Gete

2.1 Pendahuluan

Istilah mikoriza secara umum digunakan untuk menggambarkan berbagai keterkaitan atau asosiasi yang terbentuk antara akar tanaman dan jamur (Teder et al., 2020). Asosiasi ini terdapat di sebagian besar spesies dan ekosistem tumbuhan darat di dunia (Prasad et al., 2017). Bentuk asosiasi ini umumnya bersifat mutualistik, di mana terjadi pertukaran komoditas penting antara jamur dan tanaman untuk mendukung pertumbuhan dan kelangsungan hidup masing-masing (Sánchez-Ramírez et al., 2017). Mikoriza merupakan jenis kelompok jamur yang mempunyai sifat obligat artinya bahwa mikoriza tidak dapat tumbuh dan bereproduksi tanpa keberadaan tanaman inang sebagai mitranya (Husna et al., 2017). Menurut Redecker et al. (2013), terdapat tujuh jenis mikoriza, namun yang paling umum dan sering diteliti adalah endomikoriza (CMA) dan ectomikoriza. Berdasarkan klasifikasi terbaru dari INVAM (2023), CMA mencakup 40 genus dengan >300 species dan merupakan jenis mikoriza yang paling luas ditemukan di berbagai ekosistem.

Kolonisasi akar oleh CMA berasal dari tiga sumber inokulum tanah, yaitu spora, fragmen akar terinfeksi, dan miselium, yang secara kolektif disebut propagul (Giovannini et al., 2020). Perkembangan CMA dan pengaruhnya terhadap pertumbuhan tanaman cenderung lebih optimal pada kondisi tanah dengan kesuburan rendah, khususnya saat ketersediaan fosfor terbatas (Qin et al., 2022). Faktor lingkungan dan biotik berperan penting dalam menentukan komposisi dan kelimpahan komunitas CMA. Secara kimia, ketersediaan nutrisi seperti fosfor (P), kalsium (Giovannini et al.), magnesium (Mg), dan natrium (Na) secara signifikan mempengaruhi struktur komunitas CMA (Marín et al., 2017). Tingkat keasaman tanah juga berpengaruh terhadap mobilitas ion dan penyerapan nutrisi yang dibutuhkan untuk kelangsungan hidup CMA (Jamiołkowska et al., 2018). Selain itu, CMA tumbuh optimal dalam kisaran kelembaban dan suhu tertentu, sementara kondisi tanah yang terlalu basah dapat mengurangi ketersediaan oksigen (Nazari et al., 2023). Secara biotik, jenis tanaman inang dan eksudat akar memiliki pengaruh selektif terhadap spesies CMA yang berasosiasi, sehingga mempengaruhi tingkat kolonisasi (John & Ray, 2024). Dominasi jenis mikoriza lain seperti ektomikoriza dapat menurunkan keragaman dan kelimpahan AMF dalam suatu ekosistem (Marín et al., 2017).

Mikoriza komersial yang beredar di pasaran umumnya merupakan hasil isolasi dari wilayah tertentu, sehingga efektivitasnya dapat menurun ketika diaplikasikan pada lingkungan yang berbeda karena memerlukan waktu adaptasi. Silva-Castro et al. (2022) menyatakan bahwa CMA indigenous lebih efektif dalam memulihkan tanah yang terkontaminasi logam berat dibandingkan dengan CMA non-lokal. Berdasarkan wawancara dengan petani di Kabupaten Sikka, Nusa Tenggara Timur, diketahui bahwa pengetahuan petani mengenai pupuk mikoriza masih rendah, sehingga pemanfaatannya pun sangat terbatas. Faktor lain yang menjadi kendala adalah harga pupuk mikoriza yang relatif mahal, yaitu sekitar 30-70 ribu rupiah per kilogram, serta ketersediaannya yang terbatas di toko-toko pertanian setempat.

Bendungan Napun Gete berada dalam wilayah DAS Nebe seluas 23.786,17 ha, dengan daerah hulu seluas 3.223,21 ha mencakup Desa Tanarawa, Natarmage, dan Tua Bao. Wilayah hulu ini memiliki keragaman penggunaan lahan berupa hutan sekunder, kebun campur, dan semak belukar; kemiringan lereng 0-25%, 25-40%, dan >40%; serta dua jenis tanah utama, yaitu andisol dan alfisol. Hasil overlay ketiga peta tersebut menghasilkan 13 unit lahan dengan keragaman penggunaan lahan dan

jenis tanaman, termasuk tanaman tahunan (kakao, jambu mete, kemiri, kayu-kayuan) dan tanaman pangan (padi gogo, jagung, kacang-kacangan). Keanekaragaman kondisi biofisik ini mengindikasikan potensi keberagaman species, populasi dan kelimpahan CMA. Oleh karena itu, penelitian untuk mengidentifikasi species, populasi dan kelimpahan CMA di wilayah hulu Bendungan Napun Gete menjadi penting untuk mendukung pengelolaan sumber daya lahan secara berkelanjutan.

2.2 Metode

2.2.1 Lokasi penelitian

Lokasi penelitian ini dilaksanakan pada wilayah hulu bendungan Napun Gete. Kawasan hulu bendungan Napun Gete termasuk ke dalam DAS Nebe, secara administratif lokasi penelitian terletak pada Desa Tuabao, Desa Tanarawa, dan Desa Natarmage yang termasuk ke dalam Kecamatan Waiblama, Kabupaten Sikka, Provinsi Nusa Tenggara Timur. Identifikasi jenis, populasi dan kelimpahan spora mikoriza dilakukan di Laboratorium Jamur Pangan dan Pupuk Hayati, Departemen Budidaya Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Hasanuddin Makassar. Pengambilan sampel dilakukan pada Bulan Maret 2023 dan dilanjutkan pengamatan laboratorium sampai dengan bulan Juni 2023.

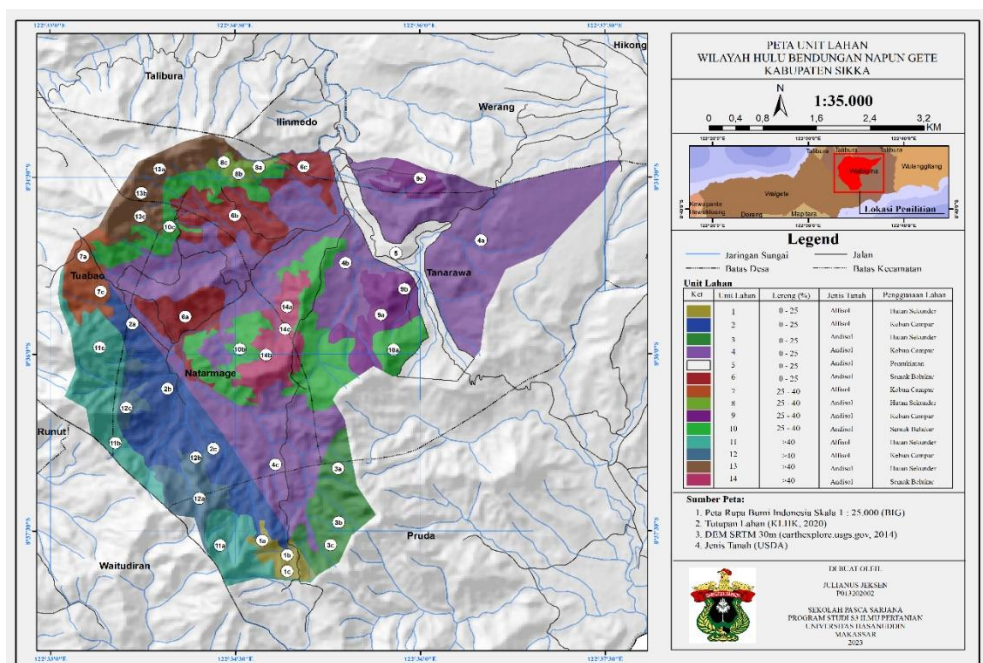
2.2.2 Alat dan bahan

Alat yang digunakan adalah software Arcgis 10.8, software SPSS, Aplikasi Avenza Maps, meteran, cangkul, plastik, timbangan digital, saringan bertingkat dengan ukuran 750 μm , 250 μm , 100 μm , 50 μm , tabung reaksi, mesin sentrifugal, corong, erlenmeyer, petridish, mikroskop, handcounter, kamera, alat tulis, dan bahan yang digunakan adalah sampel tanah dan kertas saring.

2.2.3 Identifikasi species, populasi dan kelimpahan CMA

Identifikasi species, populasi dan kelimpahan CMA dilakukan pada seluruh sampel tanah yang diambil. Berdasarkan pembuatan peta penggunaan lahan (Lampiran 1) pada wilayah hulu bendungan Napun Gete terdapat tiga jenis penggunaan lahan yaitu: hutan sekunder, kebun campur dan semak belukar. Berdasarkan pembuatan peta kemiringan lereng (Lampiran 2) pada wilayah hulu bendungan Napun Gete dibagi menjadi tiga jenis kemiringan lereng yaitu: 0-25%, 25-40% dan >40%.

Berdasarkan pembuatan peta jenis tanah (Lampiran 3) pada wilayah hulu bendungan Napun Gete terdapat dua jenis tanah yaitu: andisol dan alfisol. Berdasarkan hasil overlay dari ketiga peta di atas, diperoleh 14 keragaman atau unit lahan. Namun, karena terdapat area permukiman di dalamnya, satu unit dieliminasi (U5) sehingga yang digunakan dalam penelitian ini adalah 13 unit lahan (Gambar 2.1), selanjutnya semua unit lahan dibagi menjadi dua sampel tanah berdasarkan kedalaman tanah yaitu 0-25 cm dan 25-50 cm. Pengulangan pengambilan sampel tanah dilakukan pada setiap unit lahan sebanyak tiga kali sehingga total seluruh sampel tanah yang diamati terdapat 78 sampel tanah (13x2x3). Tanah yang diambil pada setiap sampel sebanyak 2 kg dan pengambilan dilakukan pada daerah rhizosfer. Untuk dapat melakukan indentifikasi jenis dan populasi spora CMA dilakukan pemisahan spora CMA dari tanah dengan menggunakan metode pengayakan dan sentrifugasi yang mengacu kepada Brundrett et al. (1996), setelah mendapatkan spora CMA selanjutnya dilakukan indentifikasi spora menggunakan metode mikroskopik berdasarkan karakteristik morfologi seperti bentuk, warna, dan ornamen. Dari hasil pengamatan ini akan ditentukan jenis, populasi dan kelimpahan CMA, penentuannya didasarkan pada kesamaan dengan standar spora menurut Brundrett et al. (1996) dan INVAM (2023) serta Pérez and Schenck (1990).



Gambar 2.1 Peta unit lahan

2.2.4 Analisis data

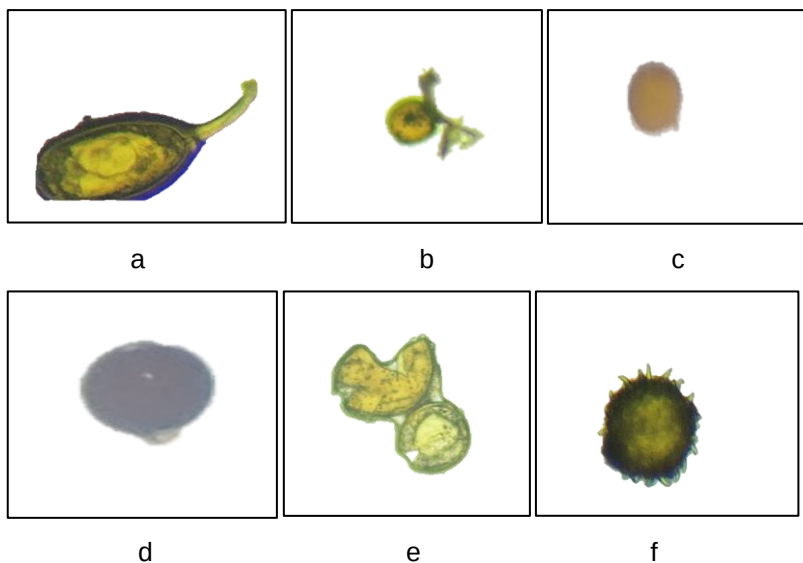
Data hasil penelitian kelimpahan spora CMA dalam hal ini jumlah spora dianalisis menggunakan rancangan petak terpisah menggunakan software SPSS dengan petak utama yaitu faktor kedalaman tanah dimana terdiri dari dua bagian yaitu K₁: 0-25 cm dan K₂: 25-50 cm sedangkan anak petak merupakan unit lahan yang terdiri dari 13 unit lahan (U₁, U₂, U₃, U₄, U₆, U₇, U₈, U₉, U₁₀, U₁₁, U₁₂, U₁₃, U₁₄) kemudian masing-masing perlakuan diulang sebanyak tiga kali (a, b, c) sehingga total seluruh perlakuan 78 (Gambar 2.1). Jika hasil ANOVA menunjukkan pengaruh yang nyata maka akan dilanjutkan dengan uji beda menggunakan uji Tukey.

2.3. Hasil dan Pembahasan

Identifikasi CMA secara morfologi di kawasan hulu Bendungan Napun Gete menunjukkan adanya empat genus dan 12 spesies, yaitu genus *Glomus*, *Acaulospora*, *Gigaspora*, dan *Entrophospora*. Spesies yang teridentifikasi antara lain *Glomus etunicatum*, *G. agregatum*, *G. moseae*, *G. intraradices*, *G. rubiformis*, *Acaulospora foveata*, *A. tuberculata*, *A. cf. undulata*, *A. scrobiculata*, *Gigaspora albida*, *G. margarita*, dan *Entrophospora infrequens*. Genus *Glomus* mendominasi populasi dengan proporsi 81,98%, diikuti *Acaulospora* 13,29%, *Gigaspora* 4,68%, dan *Entrophospora* 0,05%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa genus *Glomus* memiliki sebaran luas dan konsisten terdeteksi pada seluruh titik sampel, baik pada kedalaman 0-25 cm maupun 25-50 cm. Sebaliknya, genus *Acaulospora*, *Gigaspora*, dan *Entrophospora* terdeteksi tidak merata dan sering tidak muncul pada setiap pengambilan sampel (Lampiran 4). Temuan ini menunjukkan bahwa wilayah hulu Bendungan Napun Gete memiliki potensi CMA yang beragam, dengan *Glomus* sebagai genus yang paling dominan dan berperan penting dalam ekosistem tanah setempat.

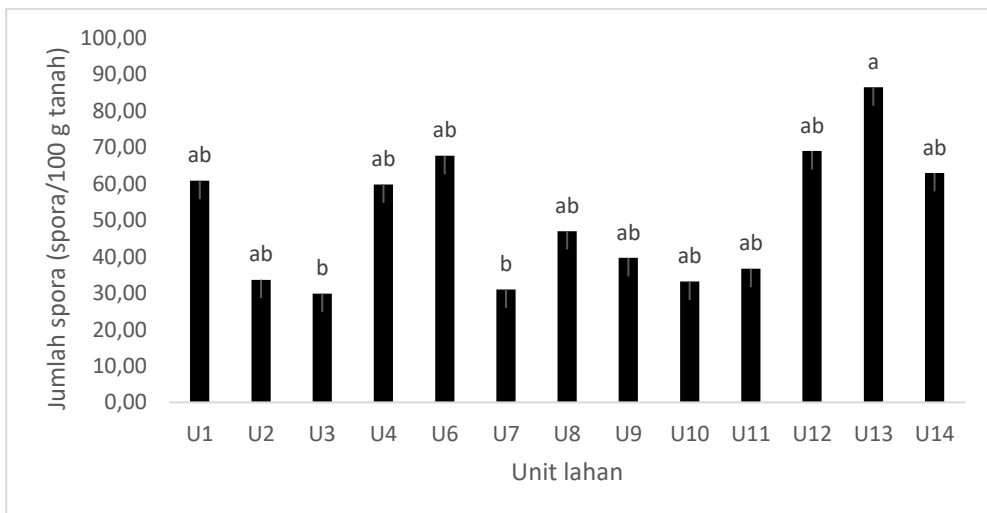
Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Proborini et al. (2013) yang menyatakan bahwa pada daerah lahan kering di Bali, CMA didominasi oleh Genus *Glomus*, *Acaulospora*, dan *Gigaspora*, sementara *Entrophospora* dan *Scutelospora* ditemukan dalam jumlah terbatas. Ketiga genus dominan tersebut memiliki kemampuan adaptasi tinggi terhadap kondisi kering, sehingga sporanya mampu bertahan dan bergerminasi lebih cepat dibandingkan *Scutelospora* dan *Entrophospora*. Hal ini diperkuat oleh penelitian Vieira et al. (2020) yang menyatakan

bahwa deteksi yang tidak konsisten terhadap genus-genus ini menunjukkan bahwa mereka lebih peka terhadap perubahan lingkungan dibandingkan dengan genus *Glomus*. Selanjutnya, *Glomus* merupakan genus dominan dari CMA yang ditemukan di berbagai ekosistem, seperti gurun, hutan alami, lahan salin, dan tanah pertanian. Kelimpahan *Glomus* menunjukkan kemampuannya dalam mengkolonisasi berbagai jenis tanah dan beradaptasi pada kondisi lingkungan yang beragam, termasuk tanah gurun yang miskin nutrisi, tanah salin, dan tanah hutan alami (Fang et al., 2023; Xu et al., 2024). *Glomus* juga mampu mengkolonisasi akar berbagai spesies tanaman, mulai dari tanaman hutan alami, tanaman pertanian seperti jagung dan alfalfa, hingga tanaman yang tumbuh di ekosistem padang rumput dan gurun. Keberadaan *Glomus* pada berbagai kedalaman tanah, dari lapisan permukaan hingga lapisan yang mengandung campuran batuan, mencerminkan fleksibilitas ekologisnya yang tinggi (Lang et al., 2022; Zhao et al., 2022). Keberhasilan kolonisasi *Glomus* dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan, seperti kadar nutrisi tanah, pH, kelembaban, dan tingkat salinitas. Meskipun terjadi variasi kondisi lingkungan, *Glomus* tetap menjadi genus dominan, yang menunjukkan kemampuannya dalam beradaptasi dan bertahan di berbagai jenis tanah (Fang et al., 2023; Wang et al., 2024).



Gambar 2.2 Spora CMA yang teridentifikasi dibawah mikroskop Binokuler (perbesaran 100X) (a) *Acaulospora foveata*, (b) *Acaulospora undulata*, (c) *Glomus moseae*, (d) *Glomus etinacatum*, (e) *Gigaspora margarita*, (f) *Entrophospora infrequent*

Hasil analisis ANOVA menunjukkan bahwa kelimpahan CMA tidak dipengaruhi secara signifikan oleh kedalaman tanah maupun interaksi perlakuan ($P > 0,05$), namun dipengaruhi sangat nyata ($P < 0,01$) oleh faktor unit lahan (Lampiran 8). Nilai tertinggi rata-rata ditemukan pada unit lahan U13 (kemiringan $>40\%$, tanah andisol, hutan sekunder) sebesar 86,5 spora/100 g tanah. Hasil uji lanjut kelimpahan spora CMA disajikan dalam gambar 2.3. Faktor kedalaman tanah dalam penelitian ini tidak berpengaruh signifikan, terhadap kelimpahan CMA, terutama karena sebagian besar aktivitas biologis CMA terkonsentrasi di lapisan atas tanah, tempat akar tanaman dan bahan organik paling melimpah. CMA membentuk simbiosis terutama di zona perakaran aktif, yang umumnya berada di kedalaman 0–20 cm. Pada lapisan tanah yang lebih dalam, meskipun kondisi fisik dan kimia mungkin berbeda, akar tanaman dan sumber karbon sebagai energi bagi CMA menjadi lebih terbatas, sehingga aktivitas mikoriza secara alami menurun. Selain itu, beberapa studi menunjukkan bahwa komposisi dan kelimpahan CMA relatif stabil pada kedalaman tanah tertentu selama masih dalam zona perakaran aktif (Wang et al., 2024). Dengan demikian, selama kondisi lingkungan mendukung dan akar tanaman masih menjangkau, kedalaman tanah bukan merupakan faktor pembatas utama bagi kelimpahan CMA, dibandingkan faktor lain seperti pH, ketersediaan hara, dan kelembapan tanah.



Gambar 2.3. Pengaruh unit lahan terhadap kelimpahan spora CMA

Kelimpahan spora CMA di wilayah hulu Bendungan Napun Gete menunjukkan variasi yang ditentukan oleh kombinasi faktor dalam unit lahan, yaitu kemiringan

lereng, jenis tanah, dan penggunaan lahan. Setiap kombinasi faktor tersebut membentuk kondisi ekosistem yang berbeda dan berpengaruh langsung terhadap dinamika biologis tanah. Unit lahan dengan kelimpahan spora tertinggi ditemukan pada hutan sekunder dengan kemiringan lereng >40% dan jenis tanah Andisol, mencapai 86,50 spora per 100 gram tanah. Kondisi ini mencerminkan kesesuaian ekologis yang tinggi bagi CMA. Keberadaan vegetasi yang regeneratif pada hutan sekunder menghasilkan serasah organik yang melimpah, meningkatkan kandungan karbon organik tanah, serta menciptakan lingkungan mikro dengan kelembapan dan suhu yang stabil. Lingkungan tersebut sangat mendukung proses sporulasi dan kolonisasi akar oleh CMA (Li et al., 2025; Reyes et al., 2019). Kemiringan lereng yang terjal sering kali memiliki tingkat gangguan antropogenik lebih rendah, sehingga struktur tanah dan komunitas biologisnya lebih alami. Keberadaan tanaman yang mampu bertahan pada lereng terjal cenderung bergantung pada simbiosis dengan CMA untuk meningkatkan penyerapan unsur hara dalam kondisi edafik yang terbatas. Hal ini turut mendorong peningkatan produksi spora CMA (Qiu et al., 2024; Xiao et al., 2023). Drainase yang baik pada lereng curam menciptakan kondisi tanah yang beroksigen tinggi dan tidak tergenang, yang ideal bagi pertumbuhan hifa CMA. Jenis tanah Andisol juga memberikan kontribusi signifikan karena memiliki kandungan bahan organik tinggi serta tekstur yang gembur. Meskipun memiliki potensi fiksasi fosfat tinggi, kondisi ini justru meningkatkan ketergantungan tanaman terhadap CMA dalam memperoleh fosfor (Casazza et al., 2017; Yan et al., 2023).

Kelimpahan spora terendah tercatat pada unit lahan kebun campuran di lereng 25–40% dengan jenis tanah Alfisol, yaitu sebesar 29,83 spora per 100 gram tanah. Sistem kebun campuran diketahui menyebabkan gangguan fisik dan kimia tanah akibat pengolahan intensif, penggunaan pupuk kimia, serta herbisida. Gangguan ini menghambat pembentukan hifa dan spora CMA serta menurunkan peluang kolonisasi akar (Beslemes et al., 2023; Mohamed et al., 2023). Komposisi vegetasi yang homogen membatasi diversitas tanaman inang yang diperlukan oleh berbagai jenis CMA. Kondisi mikrolingkungan yang tidak stabil akibat tutupan kanopi yang tidak merata juga menyebabkan fluktuasi kelembapan dan suhu tanah yang kurang menguntungkan bagi pertumbuhan CMA (Belay et al., 2020).

Unit lahan semak belukar dengan jenis tanah Andisol pada lereng landai menunjukkan kelimpahan spora yang relatif tinggi, yaitu 67,67 spora per 100 gram tanah. Meskipun semak belukar umumnya memiliki komposisi vegetasi yang terbatas

dan tidak stabil, keberadaan Andisol dan kemiringan lereng yang landai dapat menciptakan kondisi edafik yang lebih baik seperti kelembapan tanah cukup dan aktivitas mikroba yang relatif aktif. Tekstur tanah yang gembur dan drainase yang baik turut mendukung pembentukan dan pertumbuhan CMA. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kelimpahan CMA di semak belukar lebih rendah dibandingkan hutan alami, tetapi dalam kondisi tanah tertentu seperti Andisol, nilai kelimpahan dapat meningkat (Asmelash et al., 2021; Asmelash et al., 2016). Beberapa unit lahan dengan kondisi edafik dan penggunaan lahan serupa menunjukkan perbedaan kelimpahan spora, yang mengindikasikan adanya pengaruh kuat dari interaksi kompleks antar faktor unit lahan. Sebagai contoh, pada jenis tanah Andisol dan kemiringan 25–40%, kelimpahan CMA pada hutan sekunder lebih tinggi (47,00 spora) dibandingkan kebun campuran (39,67 spora), menegaskan peran penting penggunaan lahan terhadap komunitas CMA. Proses transisi ekosistem dari lahan budidaya menuju hutan sekunder meningkatkan aktivitas enzimatik, biomassa mikroba tanah, dan kandungan fosfor, yang berperan dalam restrukturisasi komunitas CMA (Liang et al., 2023). Jenis tanah Andisol secara umum lebih mendukung kelimpahan CMA dibandingkan Alfisol. Kandungan bahan organik yang lebih tinggi, kemampuan menahan air, dan struktur tanah yang lebih gembur pada Andisol menciptakan lingkungan yang lebih sesuai untuk pertumbuhan CMA. Meskipun Alfisol lebih stabil dalam hal fiksasi hara, kandungan bahan organik yang lebih rendah serta kerentanan terhadap degradasi memperlemah interaksi antara tanaman dan CMA. Sifat fisik dan kimia tanah seperti pH, kadar air, dan ketersediaan hara makro (N, P, K) merupakan faktor utama yang mempengaruhi struktur dan kelimpahan komunitas CMA, dengan genus *Glomus* sebagai dominan dalam banyak ekosistem (Davison et al., 2021; Yan et al., 2023).

Distribusi kelimpahan spora CMA) di wilayah hulu Bendungan Napun Gete menunjukkan bahwa unit lahan merupakan faktor utama yang membentuk kondisi ekologis dan edafik yang berpengaruh langsung terhadap keberadaan CMA. Setiap kombinasi antara kemiringan lereng, jenis tanah, dan penggunaan lahan menciptakan lingkungan mikro yang berbeda dalam hal ketersediaan nutrisi, kelembapan tanah, struktur agregat, serta potensi simbiosis akar. Hutan sekunder yang berada pada lereng terjal dan tanah Andisol terbukti memberikan kondisi yang paling ideal bagi kelimpahan spora CMA, sedangkan kebun campuran dan semak belukar yang dikelola secara intensif atau memiliki vegetasi kurang stabil

menghasilkan kelimpahan yang lebih rendah. Temuan ini menegaskan bahwa CMA tidak hanya dipengaruhi oleh satu faktor lingkungan tunggal, tetapi oleh interaksi kompleks dari berbagai komponen dalam unit lahan yang saling mendukung atau menghambat. Keberadaan CMA yang tinggi merupakan indikator penting dari kualitas biologis tanah dan kemampuan ekosistem dalam mendukung fungsi-fungsi ekologis seperti siklus hara, stabilitas struktur tanah, dan produktivitas vegetasi. Pemahaman mendalam tentang karakteristik unit lahan menjadi dasar penting dalam perencanaan pengelolaan lanskap berbasis ekologi, terutama untuk konservasi dan rehabilitasi lahan di daerah tangkapan air bendungan. Informasi ini dapat dimanfaatkan untuk mendorong strategi penggunaan lahan yang mempertimbangkan peran CMA sebagai komponen vital dalam menjaga keseimbangan ekosistem tanah secara berkelanjutan.

2.4. Kesimpulan

Hasil identifikasi CMA secara morfologi di kawasan hulu Bendungan Napun Gete menunjukkan keberadaan empat genus dan 12 spesies, yaitu genus *Glomus*, *Acaulospora*, *Gigaspora*, dan *Entrophospora*. Spesies yang teridentifikasi antara lain *Glomus etunicatum*, *G. agregatum*, *G. moseae*, *G. intraradices*, *G. rubiformis*, *Acaulospora foveata*, *A. tuberculata*, *A. cf. undulata*, *A. scrobiculata*, *Gigaspora albida*, *G. margarita*, dan *Entrophospora infrequens*. Genus *Glomus* mendominasi populasi dengan proporsi 81,98%, diikuti *Acaulospora* 13,29%, *Gigaspora* 4,68%, dan *Entrophospora* 0,05%. Kelimpahan spora tertinggi rata-rata mencapai 86,5 spora per 100 gram tanah. Temuan ini menunjukkan bahwa kawasan hulu Bendungan Napun Gete memiliki potensi inokulum CMA yang tinggi untuk mendukung Biokonservasi tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- Asmelash, F., Bekele, T., Belay, Z., & Kebede, F. (2021). Soil physicochemical property and arbuscular mycorrhizal fungi resilience to degradation and deforestation of a dry evergreen Afromontane forest in central Ethiopia. *Land Degradation & Development*, 32(11), 3338-3350. <https://doi.org/10.1002/ldr.4011>
- Asmelash, F., Bekele, T., & Birhane, E. (2016). The potential role of arbuscular mycorrhizal fungi in the restoration of degraded lands. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1095. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01095>
- Belay, Z., Negash, M., Kaseva, J., Vestberg, M., & Kahiluoto, H. (2020). Native forests but not agroforestry systems preserve arbuscular mycorrhizal fungal species richness in southern Ethiopia. *Mycorrhiza*, 30(6), 749-759. <https://doi.org/10.1007/s00572-020-00984-6>
- Beslemes, D., Tigka, E., Roussis, I., Kakabouki, I., Mavroeidis, A., & Vlachostergios, D. (2023). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on nitrogen and phosphorus uptake efficiency and crop productivity of two-rowed barley under different crop production systems. *Plants*, 12(9), 1908. <https://doi.org/10.3390/plants12091908>
- Brundrett, M., Bougher, N., Dell, B., Grove, T., & Malajczuk, N. (1996). *Working with mycorrhizas in forestry and agriculture* (Vol. 32). Australian Centre for International Agricultural Research Canberra. <http://surl.li/zmhxzm>
- Casazza, G., Lumini, E., Ercole, E., Dovana, F., Guerrina, M., Arnulfo, A., Minuto, L., Fusconi, A., & Mucciarelli, M. (2017). The abundance and diversity of arbuscular mycorrhizal fungi are linked to the soil chemistry of screes and to slope in the Alpic paleo-endemic Berardia subacaulis. *PLoS One*, 12(2), e0171866. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171866>
- Davison, J., Moora, M., Semchenko, M., Adenan, S. B., Ahmed, T., Akhmetzhanova, A. A., Alatalo, J. M., Al-Quraishy, S., Andriyanova, E., & Anslan, S. (2021). Temperature and pH define the realised niche space of arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 231(2), 763-776. <https://doi.org/10.1111/nph.17240>
- Fang, L.-L., Liu, Y.-J., Wang, Z.-H., Lu, X.-Y., Li, J.-H., & Yang, C.-X. (2023). Electrical conductivity and pH are two of the main factors influencing the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities in the vegetation succession series of Songnen Saline-Alkali Grassland. *Journal of Fungi*, 9(9), 870. <https://doi.org/10.3390/jof9090870>
- Giovannini, L., Palla, M., Agnolucci, M., Avio, L., Sbrana, C., Turrini, A., & Giovannetti, M. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi and associated microbiota as plant biostimulants: research strategies for the selection of the best performing inocula. *Agronomy*, 10(1), 106. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010106>

- Husna, Tuheteru, F. D., & Arif, A. (2017). Arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth on serpentine soils. *Arbuscular mycorrhizas and stress tolerance of plants*, 293-303. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4115-0_12
- INVAM. (2023). *Classification of Glomeromycota*. The University of Kansas. <https://invam.ku.edu/classification>
- Jamiołkowska, A., Księżniak, A., Gałązka, A., Hetman, B., Kopacki, M., & Skwaryło-Bednarz, B. (2018). Impact of abiotic factors on development of the community of arbuscular mycorrhizal fungi in the soil: a review. *International agrophysics*, 32(1), 133-140. <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0090>
- John, S. A., & Ray, J. G. (2024). Ecology and diversity of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in rice (*Oryza sativa* L.) in South India: an ecological analysis of factors influencing AMF in rice fields. *Journal of Applied Microbiology*, 135(10), lxae256. <https://doi.org/10.1093/jambio/lxae256>
- Lang, M., Zhang, C., Su, W., Chen, X., Zou, C., & Chen, X. (2022). Long-term P fertilization significantly altered the diversity, composition and mycorrhizal traits of arbuscular mycorrhizal fungal communities in a wheat-maize rotation. *Applied Soil Ecology*, 170, 104261. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104261>
- Li, Y., Zhang, Z., Tan, S., Lyv, S., Zhou, L., Yu, L., Tang, C., & You, Y. (2025). Diversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Increases with Tree Age in Karstic Rocky Desertification Areas of Southwestern China. *Forests* (19994907), 16(1). <https://doi.org/10.3390/f16010024>
- Liang, M., Wu, Y., Zhao, Q., Jiang, Y., Sun, W., Liu, G., Ma, L., & Xue, S. (2023). Secondary vegetation succession on the Loess Plateau altered the interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and nitrogen-fixing bacteria. *Forest Ecology and Management*, 530, 120744. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120744>
- Marín, C., Aguilera, P., Oehl, F., & Godoy, R. (2017). Factors affecting arbuscular mycorrhizal fungi of Chilean temperate rainforests. *Journal of soil science and plant nutrition*, 17(4), 966-984. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017000400010>
- Mohamed, O.-z., Said, E. K., Miloud, S., Abdellatif, H., El Hassan, A., & Rachid, B. (2023). Effect of agricultural management practices on diversity, abundance, and infectivity of arbuscular mycorrhizal fungi: A review. *Symbiosis*, 91(1), 33-44. <https://doi.org/10.1007/s13199-023-00948-2>
- Nazari, M., Hemati, A., Backer, R., Lajayer, B. A., & Astatkie, T. (2023). The role of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in rhizosphere soil and plant growth regulation. In *The Role of Growth Regulators and Phytohormones in Overcoming Environmental Stress* (pp. 101-111). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-98332-7.00004-4>

- Pérez, Y., & Schenck, N. (1990). A unique code for each species of VA mycorrhizal fungi. *Mycologia*, 82(2), 256-260.
- Prasad, R., Bhola, D., Akdi, K., Cruz, C., KVSS, S., Tuteja, N., & Varma, A. (2017). Introduction to mycorrhiza: historical development. *Mycorrhiza-function, diversity, state of the Art*, 1-7. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53064-2_1
- Proborini, M. W., Sudana, M., Suarna, W., & Ristiati, N. (2013). Indigenous vesicular arbuscular mycorrhizal (VAM) fungi in cashew nut (*Anacardium occidentale* L.) plantation of North East-Bali island-Indonesia. *Journal of biology, agriculture and healthcare*, 3(3), 114-121.
- Qin, Z., Peng, Y., Yang, G., Feng, G., Christie, P., Zhou, J., Zhang, J., Li, X., & Gai, J. (2022). Relationship between phosphorus uptake via indigenous arbuscular mycorrhizal fungi and crop response: A ³²P-labeling study. *Applied Soil Ecology*, 180, 104624. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104624>
- Qiu, T., Peñuelas, J., Chen, Y., Sardans, J., Yu, J., Xu, Z., Cui, Q., Liu, J., Cui, Y., & Zhao, S. (2024). Arbuscular mycorrhizal fungal interactions bridge the support of root-associated microbiota for slope multifunctionality in an erosion-prone ecosystem. *Imeta*, 3(3), e187. <https://doi.org/10.1002/imt2.187>
- Redecker, D., Schüßler, A., Stockinger, H., Stürmer, S. L., Morton, J. B., & Walker, C. (2013). An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). *Mycorrhiza*, 23, 515-531. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00572-013-0486-y>
- Reyes, H. A., Ferreira, P. F. A., Silva, L. C., da Costa, M. G., Nobre, C. P., & Gehring, C. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi along secondary forest succession at the eastern periphery of Amazonia: Seasonal variability and impacts of soil fertility. *Applied Soil Ecology*, 136, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.12.013>
- Sánchez-Ramírez, S., Wilson, A. W., & Ryberg, M. (2017). Overview of phylogenetic approaches to mycorrhizal biogeography, diversity and evolution. *Biogeography of Mycorrhizal Symbiosis*, 1-37. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56363-3_1
- Silva-Castro, G. A., Cano, C., Moreno-Morillas, S., Bago, A., & García-Romera, I. (2022). Inoculation of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi as a strategy for the recovery of long-term heavy metal-contaminated soils in a mine-spill area. *Journal of Fungi*, 9(1), 56. <https://doi.org/10.3390/jof9010056>
- Tedersoo, L., Bahram, M., & Zobel, M. (2020). How mycorrhizal associations drive plant population and community biology. *Science*, 367(6480), eaba1223. <https://doi.org/10.1126/science.aba1223>

- Vieira, L. C., Silva, D. K. A. d., Escobar, I. E. C., Silva, J. M. d., Moura, I. A. d., Oehl, F., & Silva, G. A. d. (2020). Changes in an arbuscular mycorrhizal fungi community along an environmental gradient. *Plants*, 9(1), 52. <https://doi.org/10.3390/plants9010052>
- Wang, Z., Zhao, J., Xiao, D., Chen, M., & He, X. (2024). Higher colonization but lower diversity of root-associated arbuscular mycorrhizal fungi in the topsoil than in deep soil. *Applied Soil Ecology*, 194, 105195. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105195>
- Xiao, D., Hong, T., Chen, M., He, X., & Wang, K. (2023). Assessing the effect of slope position on the community assemblage of soil diazotrophs and root arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of Fungi*, 9(4), 394. <https://doi.org/10.3390/jof9040394>
- Xu, W., Liu, Q., Wang, B., Zhang, N., Qiu, R., Yuan, Y., Yang, M., Wang, F., Mei, L., & Cui, G. (2024). Arbuscular mycorrhizal fungi communities and promoting the growth of alfalfa in saline ecosystems of northern China. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1438771. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1438771>
- Yan, P., Hou, H., Lv, Y., Zhang, H., Li, J., Shao, L., Xie, Q., Liang, Y., Li, J., & Ni, X. (2023). Diversity characteristics of arbuscular mycorrhizal fungi communities in the soil along successional altitudes of Helan Mountain, arid, and semi-arid regions of China. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1099131. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1099131>
- Zhao, L., Zhang, K., Sun, X., & He, X. (2022). Dynamics of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in the rhizosphere of *Gymnocarpus przewalskii* in Northwest Desert, China. *Applied Soil Ecology*, 170, 104251. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104251>