

IDENTIFIKASI DAN POTENSI PERBANYAKAN JAMUR MIKORIZA ARBUSKULA DARI TANAH SALIN UNTUK BUDIDAYA SORGUM (*Sorghum bicolor* L.) DI KABUPATEN KUPANG



Marlin Marhaeni^{1*)}

¹Politeknik Pertanian Negeri Kupang

*Corresponding author: marlinmarhaenipe090@gmail.com

To cite this article:

Marhaeni, M. (2025). Identifikasi dan Potensi Perbanyak Jamur Mikoriza Arbuskula dari Tanah Salin untuk Budidaya Sorgum (*Sorghum bicolor* L.) di Kabupaten Kupang. *JIA (Jurnal Ilmiah Agribisnis) : Jurnal Agribisnis Dan Ilmu Sosial Ekonomi Pertanian*, 10(5), 466–478. <https://doi.org/10.37149/jia.v10i5.2278>

Received: July 12, 2025; **Accepted:** October 02, 2025; **Published:** October 03, 2025

ABSTRACT

The expansion of national food production is constrained by the predominance of marginal lands, particularly saline soils with low fertility and disrupted microbial activity. This study aimed to characterize the diversity of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) from saline soils in Kupang, East Nusa Tenggara, and to evaluate their potential as bioinoculants for sorghum (*Sorghum bicolor* L.). Saline soils with electrical conductivity (EC) ranging from 4.18 to 11.48 mmhos/cm were collected from six sites, each comprising five subsamples (totaling 30 samples). AMF spores were isolated through a combination of wet sieving (400–45 μ m) and 60% sucrose centrifugation, followed by morphological identification under a compound microscope. A pot experiment was arranged in a Completely Randomized Design (CRD) with six treatments (five AMF spore types and a non-inoculated control) and six replications ($n = 36$). Five dominant spore types were identified based on color: yellow, orange, white, black, and reddish-brown. Orange and yellow spores were the most abundant (39–56% and 11–33% of total spores, respectively) and exhibited the highest sporulation rates, averaging 64.25 and 50.5 spores per 100 g of soil. Inoculation enhanced root colonization of sorghum, reaching 61% with orange spores and 58% with yellow spores, compared with 24% in the control. Plant growth was also significantly improved: orange spores produced the tallest plants (79 ± 3.1 cm), while yellow spores yielded the highest leaf number (6.0 ± 0.5 leaves/plant), compared with the control (58 ± 2.7 cm and 5.0 ± 0.4 leaves/plant, respectively). These findings demonstrate that indigenous AMF spores, particularly the yellow and orange types, which are presumably in the genus *Glomus*, are highly adaptive to saline conditions and significantly enhance sorghum growth. This highlights their potential as locally sourced biofertilizers to improve crop productivity on saline marginal lands. Further molecular identification and multi-season field trials are recommended to validate their efficacy and broaden their application to other salt-tolerant crops.

Keywords: arbuscular mycorrhizal; biofertilizer fungi; saline soil; sorghum; sporulation

PENDAHULUAN

Pertumbuhan jumlah penduduk yang pesat menuntut ketersediaan pangan dalam jumlah yang semakin besar. Namun, penyediaan pangan menghadapi tantangan yang kompleks, antara lain tingginya laju degradasi lahan serta alih fungsi lahan pertanian ke non-pertanian yang tidak seimbang dengan pengembangan lahan pertanian baru. Di Pulau Timor, sebagian besar lahan tergolong marginal, dengan salah satu faktor pembatas utama adalah tingkat kesuburan tanah yang rendah. Hal ini berimplikasi pada rendahnya produktivitas tanaman budidaya. Dalam menghadapi tantangan tersebut, strategi peningkatan produktivitas pertanian perlu difokuskan pada optimalisasi pemanfaatan lahan marginal. Salah satu bentuk lahan marginal yang tersebar luas di Kabupaten Kupang adalah lahan dengan kandungan garam terlarut tinggi atau tanah salin. Di wilayah ini, tanah salin umumnya ditemukan di daerah pesisir, seperti di Desa Oebelo, Kecamatan Kupang Tengah. Kelebihan salinitas di tanah secara signifikan merusak sifat fisik dan kimia, yang menyebabkan efek merugikan pada pertumbuhan dan produktivitas tanaman. Tanah salin memiliki konsentrasi garam



terlarut tinggi yang menyebabkan tekanan osmotik, menghambat penyerapan air dan nutrisi oleh tanaman, serta menurunkan aktivitas mikroorganisme tanah yang penting dalam siklus hara (Setiawati et al., 2023). Akumulasi dampak ini mengganggu proses fisiologis tanaman seperti fotosintesis, respirasi, dan sintesis protein, sehingga menurunkan hasil panen secara signifikan. Fenomena ini menginduksi stres osmotik yang berdampak langsung terhadap keseimbangan fisiologis tanaman. Salinitas yang tinggi menghambat aktivitas mikroorganisme tanah serta enzim-enzim tanah yang penting dalam proses dekomposisi bahan organik dan siklus hara. Akibatnya, proses-proses mikrobiologis yang menunjang kesehatan tanah menjadi terganggu yang berdampak pada penurunan kualitas tanah secara keseluruhan (Teshale, 2023).

Mengingat dampak negatif salinitas terhadap kesuburan tanah dan pertumbuhan tanaman, diperlukan strategi pengelolaan yang tepat untuk memanfaatkan lahan salin secara produktif. Salah satu tanaman yang memiliki toleransi tinggi terhadap kondisi tanah salin adalah sorgum (*Sorghum bicolor* L.), yang dikenal adaptif terhadap kekeringan, genangan, dan salinitas tinggi. Penelitian menunjukkan bahwa sorgum mampu mempertahankan pertumbuhan dan biomassa bahkan pada tingkat salinitas yang melebihi 9,17 dS/m, menjadikannya kandidat unggul untuk pengembangan di lahan marginal (Ma et al., 2024). Varietas lokal seperti Numbu dan Samurai 2 telah terbukti mampu bertahan di lahan salin dengan kadar garam tinggi, sehingga berpotensi untuk diversifikasi pangan di wilayah dengan tanah bermasalah (Usnawiyah et al., 2021). Selain itu, aplikasi kalsium dan biofertilizer juga terbukti meningkatkan toleransi sorgum terhadap cekaman salinitas melalui perbaikan fisiologis tanaman (Pramukyana et al., 2021).

Untuk lebih meningkatkan ketahanan sorgum terhadap stres salinitas, pendekatan biologis seperti inokulasi dengan Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA) menjadi strategi yang menjanjikan. FMA merupakan kelompok jamur tanah yang membentuk simbiosis mutualistik dengan akar tanaman, memfasilitasi peningkatan penyerapan nutrisi penting seperti fosfor dan nitrogen, serta air, yang sangat krusial bagi kesehatan tanaman di lingkungan salin (Wang et al., 2024). FMA merupakan kelompok jamur tanah yang sangat beragam dan tersebar luas di berbagai tipe ekosistem, mulai dari padang rumput, hutan, savana, hingga lahan pertanian dan lingkungan ekstrem seperti tanah masam, alkali, dan salin. Genus utama penyusun FMA meliputi *Glomus*, *Acaulospora*, *Gigaspora*, dan *Sclerocystis*, dengan *Glomus* sp. sebagai genus yang paling dominan di berbagai habitat, termasuk tanah salin (Agustini et al., 2024). Keberadaan FMA sangat penting karena membentuk simbiosis mutualistik dengan akar tanaman, meningkatkan penyerapan unsur hara seperti fosfor dan nitrogen, serta membantu tanaman bertahan terhadap stres lingkungan seperti kekeringan dan salinitas (Kakabouki et al., 2023). FMA juga berperan dalam mengurangi dampak negatif salinitas dengan meningkatkan ketersediaan unsur hara dan mengikat ion Na^+ , sehingga mendukung pertumbuhan tanaman di lingkungan yang tidak subur (Rizki et al., 2025). Keanekaragaman FMA berkontribusi terhadap stabilitas ekosistem, produktivitas tanah, dan keberlanjutan pertanian. Pemanfaatan FMA sebagai biofertilizer alami terbukti dapat meningkatkan pertumbuhan, hasil, dan ketahanan tanaman terhadap cekaman salin melalui peningkatan penyerapan hara, aktivitas enzim antioksidan, serta rasio K^+/Na^+ yang lebih baik dalam jaringan tanaman (Tarigan et al., 2024). Kombinasi FMA dengan bakteri pelarut fosfat dan pupuk organik juga menunjukkan peningkatan signifikan dalam pertumbuhan dan kualitas nutrisi tanaman di tanah salin, bahkan dengan dosis pupuk anorganik yang lebih rendah (Setiawati et al., 2023).

Studi global menunjukkan bahwa FMA dapat meningkatkan biomassa tanaman, efisiensi fotosintesis, dan aktivitas enzim antioksidan di bawah cekaman salinitas (Dastogeer et al., 2020; Nie et al., 2024; Wang et al., 2024). Di Indonesia, aplikasi FMA seperti *Glomus mosseae* pada varietas sorgum lokal terbukti meningkatkan pertumbuhan dan efisiensi pemupukan di lahan marginal (Chowdhary & Songachan, 2025).

Namun, sebagian besar penelitian terdahulu menggunakan isolat FMA komersial atau dari wilayah lain, tanpa mempertimbangkan adaptasi lokal terhadap kondisi agroekologi spesifik. Belum ada kajian yang secara sistematis mengidentifikasi dan mengevaluasi potensi perbanyakan spora FMA dari tanah salin di Nusa Tenggara Timur untuk budidaya sorgum. Selain itu, hubungan antara tingkat salinitas tanah dengan kepadatan spora dan kolonisasi akar oleh FMA pada tanaman sorgum belum pernah diteliti secara mendalam.

Penelitian ini bertujuan untuk 1) memperoleh informasi mengenai biodiversitas dan identitas FMA pada rizosfer tanaman yang tumbuh pada tanah salin di Kabupaten Kupang, 2) mengetahui kemampuan isolat spora mikoriza asal rizosfer tanaman pada tanah salin di Kabupaten Kupang dalam memperbanyak spora dan meningkatkan pertumbuhan tanaman sorgum. Hasil penelitian ini diharapkan menjadi dasar pengembangan biofertilizer berbasis FMA lokal yang adaptif dan efektif untuk meningkatkan produktivitas lahan marginal di wilayah timur Indonesia.

MATERI DAN METODE

Lokasi dan Waktu Pengambilan Sampel

Penelitian dilaksanakan di Desa Oebelo, Kecamatan Kupang Timur, Kabupaten Kupang, Provinsi Nusa Tenggara Timur (Koordinat: 10°10'45.6"S, 123°37'12.3"E). Wilayah ini merupakan kawasan pesisir dengan tingkat salinitas tinggi akibat intrusi air laut. Titik pengambilan sampel tanah ditentukan berdasarkan gradien jarak dari garis pantai (50–200 meter) yaitu 6 titik pengambilan untuk merepresentasikan variasi kondisi salinitas yang diambil secara sig sag. Cara pengambilan sampel tanah, adalah pertama-tama permukaan tanah dibersihkan dari tumbuhan dan seresah. Sampel tanah ± 2 kg diambil dari sekitar perakaran rumput pada kedalaman 0-20 cm menggunakan linggis. Sampel tanah dimasukkan ke dalam kantong plastik yang telah diberi label, kemudian dibawa ke laboratorium fisika tanah Faperta Undana untuk analisis nilai DHL tanah serta isolasi spora FMA.

Pengukuran Salinitas Tanah

Pengukuran salinitas tanah dilakukan dengan metode ekstrak tanah:air (1:5), yaitu 10 g tanah kering udara yang telah diayak (2 mm) dicampurkan dengan 50 mL air suling, kemudian dikocok selama 30 menit pada 150 rpm, diendapkan selama 30 menit, dan filtratnya diukur menggunakan EC meter yang telah dikalibrasi dengan larutan standar (12,88 mS/cm) pada suhu 25 °C. Nilai daya hantar listrik (DHL) yang diperoleh berkisar antara 4,18–11,48 mmhos/cm (mS/cm), yang diklasifikasikan sebagai tanah salin hingga sangat salin.

Isolasi dan Identifikasi Spora FMA

Isolasi spora FMA dilakukan dengan metode kombinasi penyaringan basah bertingkat (wet sieving and decanting) menggunakan saringan berukuran 400 µm, 250 µm, 100 µm, dan 45 µm. Suspensi tanah yang melewati penyaringan kemudian dipisahkan lebih lanjut melalui sentrifugasi dua tahap dengan larutan sukrosa 60% (Walker et al., 2007). Spora yang terpisah dari fraksi tanah dikoleksi dengan pipet steril, dicuci berulang kali dengan air steril untuk menghilangkan residu sukrosa, lalu ditempatkan dalam cawan petri/wadah steril berisi air suling. Spora yang diperoleh selanjutnya diamati untuk identifikasi morfologi (warna, ukuran, dan dinding spora) sebelum digunakan pada perlakuan inokulasi. Identifikasi spora dilakukan secara morfologis di bawah mikroskop binokuler dan mikroskop majemuk. Karakter morfologis yang diamati mencakup warna, bentuk umum, ukuran diameter, ketebalan dan tekstur dinding, serta struktur permukaan spora. Klasifikasi morfologi spora mengacu pada panduan dari Morton & Benny (1990), serta Redecker et al. (2013). Spora kemudian dikategorikan menjadi lima tipe warna dominan: kuning, oranye, putih, hitam, dan kemerahan. Karena keterbatasan fasilitas, identifikasi molekuler (misalnya PCR atau sekuensing DNA) belum dilakukan dalam penelitian ini, namun direkomendasikan untuk studi lanjutan guna mengkonfirmasi spesies.

Uji Perbanyak Spora

Uji perbanyak spora dilakukan menggunakan tanaman sorgum (*Sorghum bicolor* L. var. Numbu) sebagai inang. Desain penelitian yang digunakan adalah Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan enam perlakuan, yakni lima tipe spora Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA) berdasarkan warna dominan (kuning, oranye, putih, hitam, kemerahan) serta satu kontrol (tanpa inokulasi). Masing-masing perlakuan diulang sebanyak enam kali sehingga total unit percobaan adalah 36. Percobaan dilakukan dalam polibag berukuran 5 kg yang diisi dengan 3 kg tanah salin dari lokasi penelitian, tanpa proses sterilisasi untuk menjaga kealamian kondisi mikrobiota tanah. Benih sorgum ditanam dalam polibag, masing-masing berisi tiga benih. Setelah berkecambah, satu tanaman paling sehat dipilih untuk dipelihara hingga panen. Sebelum tanam, sebanyak 25 spora dari masing-masing tipe diinokulasikan langsung ke lubang tanam. Pemeliharaan dilakukan di ruang terbuka tanpa naungan, dengan penyiraman dua kali sehari tanpa penambahan pupuk, untuk memastikan bahwa efek inokulasi FMA dapat diamati secara alami. Tanaman dipelihara hingga fase generatif awal. Saat panen, tanah diayak untuk menghitung ulang jumlah spora per 100 g tanah (kepadatan sporulasi) menggunakan protokol pengayakan–sentrifugasi yang sama.

Parameter yang diamati dalam penelitian ini untuk menjawab tujuan pertama yaitu memperoleh informasi mengenai biodiversitas dan identitas FMA pada rizosfer tanaman yang tumbuh pada tanah salin di Kabupaten Kupang, meliputi: (1) Densitas spora (rata-rata jumlah spora per 100 g tanah) dari lokasi pengambilan sampel (2) Keragaman FMA berdasarkan pengelompokan (Relative abundance) (3) Karakteristik spora FMA. Untuk menjawab tujuan kedua dalam mengetahui kemampuan isolat spora mikoriza asal rizosfer tanaman pada tanah salin di Kabupaten Kupang dalam memperbanyak spora dan meningkatkan pertumbuhan tanaman sorgum, maka parameter

yang diamati adalah (1) Densitas spora (rata-rata jumlah spora per 100 g tanah) dari rizosfer Sorgum (2) Tinggi tanaman dan jumlah daun dilakukan pada umur 8 MST .

Data dianalisis secara analisis deskriptif, analisis statistik korelasi, analisis kelimpahan relatif, serta analisis statistika parametrik untuk data pertumbuhan tanaman sorgum.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Biodiversitas Dan Identitas FMA Pada Rizosfer Tanaman Yang Tumbuh Pada Tanah Salin Di Kabupaten Kupang

Penelitian ini secara sistematis telah mengidentifikasi lima tipe utama spora Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA) berdasarkan hasil isolasi dari enam titik tanah salin di Kabupaten Kupang, yaitu spora kuning, oranye, putih, hitam, dan kemerahan. Data kepadatan dan sebaran spora menunjukkan variabilitas yang cukup besar antar lokasi, dengan kisaran 73-1.863 spora per 100g tanah. Kelimpahan spora tertinggi ditemukan pada lokasi dengan vegetasi dominan belulang dan bakau, serta tingkat salinitas sedang. Spora oranye dan kuning merupakan tipe yang paling dominan, dengan proporsi 39–56% dan 11–33% dari total spora di setiap titik, mengindikasikan adaptasi lebih baik terhadap lingkungan salin ekstrem. Karakter morfologis yang diidentifikasi meliputi bentuk bulat dengan permukaan halus/mengkilap (kuning, putih, kemerahan), dan kasar (oranye). Analisis spesies dan genus berdasarkan ciri morfologi mengarah pada dominasi genus *Glomus*. Secara rinci terkait informasi biodiversitas dan identitas FMA pada rizosfer tanaman yang tumbuh pada tanah salin di Kabupaten Kupang, sebagai berikut:

1. Densitas spora FMA pada lokasi pengambilan sampel tanah

Penelitian dilaksanakan di Desa Oebelo, Kecamatan Kupang Timur, Kabupaten Kupang, Nusa Tenggara Timur, yang merupakan kawasan pesisir dengan kondisi tanah yang mengalami tekanan salinitas tinggi akibat intrusi air laut, terutama selama musim kemarau. Enam titik pengambilan sampel dipilih berdasarkan jarak dari garis pantai (50–200 meter) guna mewakili variasi gradien salinitas secara alami.

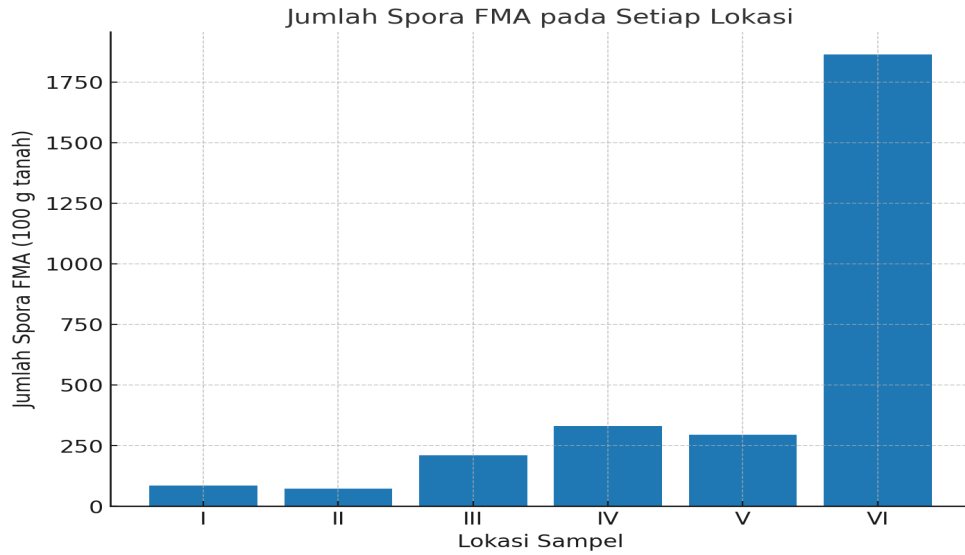
Setiap titik pengambilan memiliki vegetasi dominan yang berbeda, seperti rumput jampang (*Ischaemum timorense*), rumput teki (*Cyperus sp.*), belulang, dan bakau (*Rhizophora sp.*). Vegetasi tersebut menunjukkan toleransi terhadap lingkungan salin dan diduga berasosiasi dengan jenis Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA) tertentu.

Hasil pengukuran menunjukkan nilai DHL tanah berkisar antara 4,18 hingga 11,48 mmhos/cm, mengindikasikan variasi tingkat cekaman salin. Hasil identifikasi menunjukkan adanya variasi jumlah spora FMA antar lokasi yang dipengaruhi oleh tingkat salinitas, jarak dari bibir pantai, dan vegetasi dominan. Total jumlah spora yang berhasil diisolasi pada tahapan penelitian ini adalah 2857 spora yang tersebar secara bervariasi pada 6 titik pengambilan sampel. Jumlah spora terendah ditemukan pada lokasi II (73 spora/100 g tanah) dengan tingkat salinitas 4,32 mmhos, sedangkan jumlah spora tertinggi terdapat pada lokasi VI (1.863 spora/100 g tanah) dengan tingkat salinitas 6,38 mmhos. Secara umum, lokasi dengan tingkat salinitas sedang (6–9 mmhos) cenderung memiliki populasi spora lebih tinggi dibandingkan lokasi dengan salinitas rendah (± 4 mmhos) maupun sangat tinggi (≥ 11 mmhos). Hal ini mengindikasikan bahwa terdapat kisaran salinitas optimum yang mendukung perkembangan FMA. Selain itu, keberadaan vegetasi tertentu seperti rumput belulang dan bakau juga berasosiasi dengan kepadatan spora yang lebih tinggi dibandingkan lokasi dengan dominasi rumput jampang saja. Fenomena ini sejalan dengan temuan sebelumnya bahwa FMA yang berasal dari habitat salin atau sabkha menunjukkan kemampuan sporulasi lebih tinggi di bawah tekanan salinitas sedang (sekitar 100 mM NaCl), dibandingkan isolat non-salin (Malik et al., 2022). Sebaliknya, pada salinitas ekstrem, sporulasi justru menurun, namun spesies adaptif lokal tetap mampu bertahan. Ini mengindikasikan bahwa jenis FMA di lokasi tersebut telah beradaptasi terhadap tekanan salin, mendukung temuan Pooja et al. (2025) dan (Boorboori & Lackóová (2024) yang menyatakan bahwa FMA dari lahan salin memiliki kapasitas sporulasi dan simbiosis lebih tinggi dibandingkan dari lahan netral. Densitas Spora pada berbagai tingkat salinitas pada lokasi penelitian terlihat pada Tabel 1.

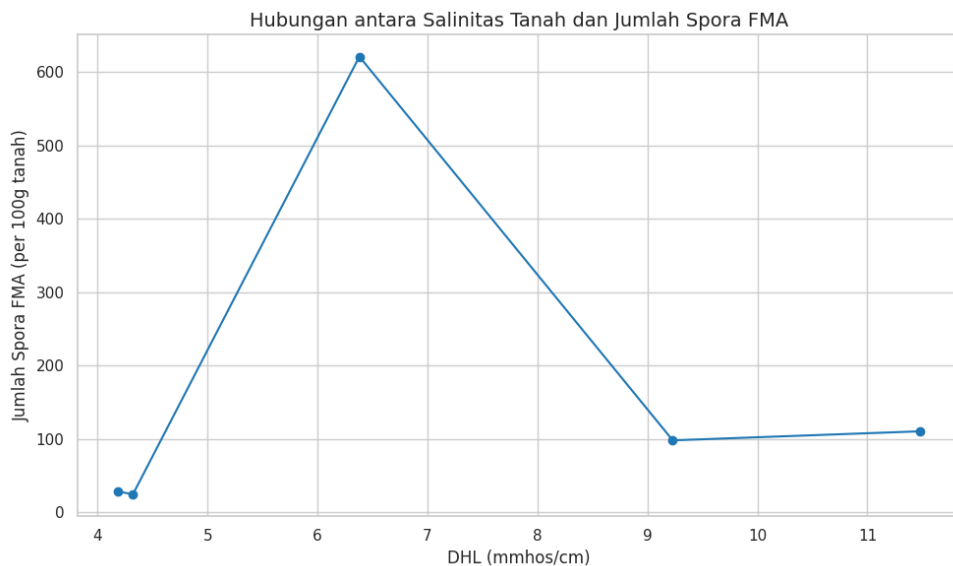
Jika dikaitkan dengan tingkat salinitas tanah, jumlah spora Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA) yang ditemukan pada tanah dengan tingkat salinitas berbeda di enam lokasi penelitian menunjukkan variasi yang cukup besar (Tabel 1). Jumlah spora berkisar antara 73 spora per 100 g tanah (Lokasi II, DHL 4,32 mmhos) hingga 1.863 spora per 100 g tanah (Lokasi VI, DHL 6,38 mmhos). Rata-rata jumlah spora per lokasi juga menunjukkan perbedaan yang nyata, dengan nilai terendah 24,33 (Lokasi II) dan tertinggi 621,00 (Lokasi VI).

Tabel 1. Densitas spora FMA pada berbagai tingkat salinitas tanah di lokasi penelitian

DHL	Lokasi	Total spora FMA dalam 100 gram tanah	Rata-Rata
4,18	I	86	28,67
4,32	II	73	24,33
11,32	III	210	70,00
11,48	IV	331	110,33
9,23	V	294	98,00
6,38	VI	1863	621,00
Total		2857	103,50



Gambar 1. Jumlah Sebaran Spora FMA pada setiap tingkat salinitas



Gambar 2. Diagram Garis Hubungan antara DHL (salinitas) dengan jumlah spora FMA

Secara visual, grafik kolom (Gambar 1) memperlihatkan bahwa lokasi VI memiliki dominasi jumlah spora yang sangat tinggi dibandingkan lokasi lainnya. Hal ini mengindikasikan adanya kondisi lingkungan mikro di lokasi tersebut yang lebih sesuai untuk perkembangan FMA, meskipun tingkat salinitas tanah relatif sedang.

Analisis hubungan antara tingkat salinitas (DHL) dan jumlah spora FMA (Gambar 2) menunjukkan bahwa tidak terdapat pola yang konsisten. Hasil analisis statistik menunjukkan nilai

korelasi (r) = -0,078, yang berarti hubungan antara DHL dengan jumlah spora FMA sangat lemah dan cenderung tidak signifikan. Dengan demikian, faktor salinitas bukan satu-satunya penentu keberlimpahan spora, melainkan kemungkinan besar dipengaruhi oleh kombinasi faktor lain, seperti jenis vegetasi dominan, kandungan bahan organik tanah, dan keberadaan inang potensial.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Begum et al. (2019) yang melaporkan bahwa meskipun salinitas dapat memengaruhi distribusi FMA, faktor vegetasi inang dan kesuburan tanah juga memainkan peran penting dalam menentukan kelimpahan spora. Misalnya, vegetasi seperti rumput belulang dan bakau di lokasi IV dan VI tampak mendukung kepadatan spora yang lebih tinggi dibandingkan dengan lokasi yang didominasi rumput jampang (lokasi I–II).

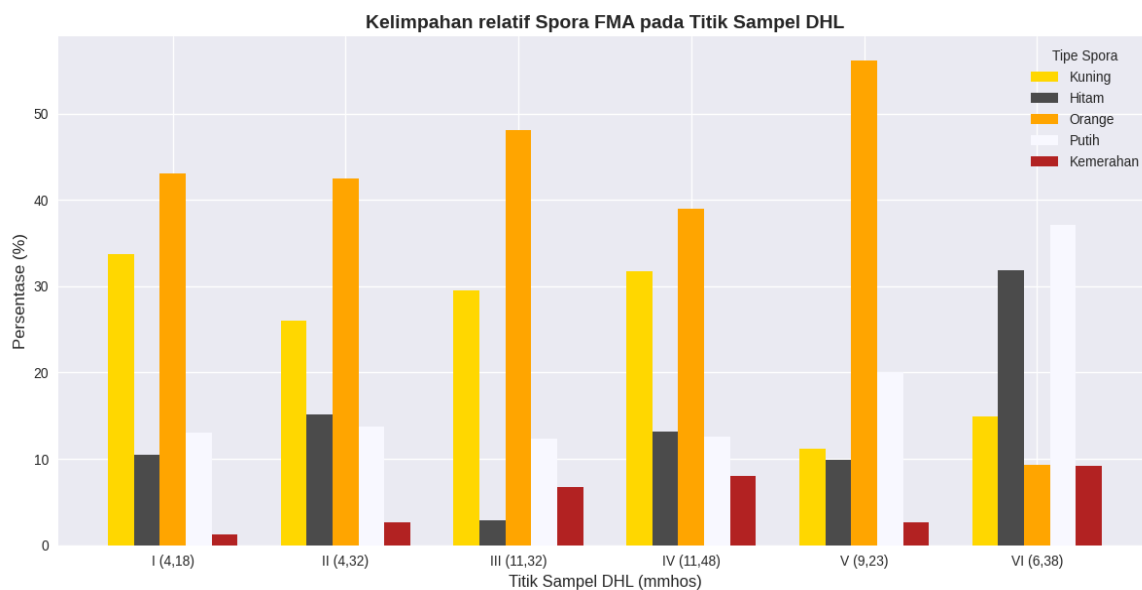
Temuan ini memperkuat dugaan bahwa komunitas FMA di wilayah pesisir memiliki adaptasi terhadap tekanan salinitas. Spora FMA tampaknya tidak hanya mampu bertahan, tetapi juga berkembang lebih aktif pada kondisi tanah dengan DHL tinggi. Hal ini sejalan dengan literatur terbaru yang menunjukkan bahwa beberapa genus FMA, seperti *Glomus* dan *Acaulospora*, memiliki mekanisme fisiologis untuk mendukung tanaman inang dalam menghadapi stres salin melalui peningkatan rasio K^+/Na^+ dan aktivasi sistem antioksidan (Pooja et al., 2025; Rajabi Dehnavi et al., 2023).

2. Keragaman FMA berdasarkan kelimpahan Realatif atau *Relative abundance* (RA)

Kelimpahan spora FMA hasil isolasi dari berbagai lokasi penelitian disajikan pada Tabel 2. Data tersebut menunjukkan bahwa jumlah spora bervariasi antar lokasi dengan kisaran 73–1.863 spora per 100 g tanah, yaitu masing-masing 86 spora pada lokasi I, 73 spora pada lokasi II, 210 spora pada lokasi III, 331 spora pada lokasi IV, 294 spora pada lokasi V, dan 1.863 spora pada lokasi VI. Berdasarkan karakter morfologi yang teramati, spora FMA dari seluruh lokasi dapat diklasifikasikan ke dalam lima tipe utama menurut warna, yakni tipe 1 (kuning), tipe 2 (hitam), tipe 3 (oranye), tipe 4 (putih), dan tipe 5 (kemerahan).

Tabel 2. Kelimpahan relatif Spora FMA pada lokasi penelitian

Tipe spora	Titik Sampel DHL (mmhos)					
	I (4,18)	II (4,32)	III (11,32)	IV (11,48)	V (9,23)	VI (6,38)
1 (Kuning) (%)	33,70	26,02	29,50	31,70	11,20	14,9
2 (Hitam) (%)	10,50	15,10	2,90	13,20	9,86	31,8
3 (Orange) (%)	43,02	42,50	48,05	39,03	56,10	9,3
4 (Putih) (%)	13,10	13,70	12,40	12,60	20,06	37,1
5 (Kemerahan) (%)	1,20	2,70	6,70	8,06	2,70	9,2



Gambar 3. Kelimpahan Relatif Spora FMA Berdasarkan Tingkat Salinitas Tanah

Secara kuantitatif, analisis kelimpahan menunjukkan bahwa spora oranye merupakan tipe yang paling dominan, berkisar antara 39% hingga 56% dari total spora yang ditemukan di tiap titik.

Spora kuning berada pada urutan kedua dengan kisaran 11%–33%, sementara spora kemerahan merupakan tipe paling sedikit (1%–8%). Rendahnya proporsi spora kemerahan diperkirakan akibat ketidakmampuan adaptif terhadap kondisi salin yang tinggi, sehingga tidak digunakan dalam tahap perbanyakan selanjutnya. Kecenderungan dominasi spora berwarna oranye dan kuning pada berbagai titik sampling menunjukkan bahwa kedua tipe ini memiliki kapasitas toleransi terhadap stres salin yang relatif lebih baik dibandingkan dengan tipe lainnya.

Secara taksonomis, spora FMA berwarna oranye dan kuning sering kali diasosiasikan dengan genus *Glomus*, yakni salah satu genus dari kelompok FMA yang telah dikenal luas karena memiliki distribusi global dan ditemukan dalam berbagai jenis habitat, termasuk habitat dengan kondisi lingkungan ekstrem seperti tanah salin, kering, atau tercemar logam berat. Kemampuan adaptasi *Glomus* terhadap tekanan lingkungan yang tinggi ini diduga berkaitan erat dengan beberapa karakteristik biologis yang dimilikinya. Misalnya, genus ini memiliki siklus hidup yang cenderung lebih cepat, mampu membentuk jaringan hifa eksternal yang luas dan aktif, serta memiliki kemampuan bertahan terhadap fluktuasi suhu, kadar garam, dan ketersediaan air.

Temuan ini sejalan dengan penelitian oleh Xu et al. (2024) di lahan salin Tiongkok menunjukkan bahwa inokulasi *Glomus* lokal pada tanaman alfalfa meningkatkan biomassa, efisiensi fotosintesis, dan toleransi ion Na^+ dan Cl^- dan mengidentifikasi 40 spesies AMF dari enam genera di tanah salin Songnen, dengan *Glomus mosseae* (G.m) dan *Glomus etunicatum* (G.e) sebagai spesies dominan. Kedua spesies ini mampu membentuk simbiosis dengan alfalfa di berbagai tingkat salinitas, namun G.m menunjukkan tingkat kolonisasi dan ketergantungan yang lebih tinggi dibandingkan G.e. Namun, sporulasi spora oranye di Kupang tercatat lebih tinggi dibandingkan rata-rata sporulasi di studi tersebut (± 42 spora/100 g), mengindikasikan bahwa isolat lokal memiliki respons adaptif yang lebih kuat terhadap salinitas ekstrem.

Studi lanjutan oleh Bağ & Kocaman (2024) aplikasi jamur mikoriza memberikan pengaruh positif terhadap parameter pertumbuhan kultivar stroberi Monterey dalam berbagai kondisi stres garam, meningkatkan penyerapan nutrisi dan mengurangi efek negatif salinitas. Di ekosistem semi-arid dan mangrove, *Glomus* tetap menjadi genus dominan walaupun diversitas FMA relatif rendah, namun kelimpahan sporanya tinggi (Boorboori & Lackóová, 2024). *Glomus* dan *Gigaspora* berperan penting dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stres salinitas. Inokulasi tanaman dengan *Glomus* sp. dan *Gigaspora* sp. terbukti meningkatkan pertumbuhan, penyerapan nutrisi (terutama K, P, dan N), serta menurunkan akumulasi Na pada tanaman di tanah salin, sehingga memperbaiki rasio K/Na yang krusial untuk toleransi garam (Rahmad et al., 2025)


Secara biologis, keberhasilan sporulasi dan kolonisasi FMA tipe oranye dan kuning dapat dikaitkan dengan karakteristik morfologis seperti dinding spora yang tebal, struktur permukaan yang kompleks, serta kemampuan membentuk hifa eksternal yang ekstensif. Hifa eksternal berperan penting dalam memperluas zona serapan akar, meningkatkan efisiensi penyerapan fosfor, nitrogen, dan air, serta membantu tanaman mengatasi tekanan osmotik dan ionik akibat akumulasi Na^+ dan Cl^- .

Kondisi ini memberikan dasar ilmiah bahwa pemanfaatan FMA lokal, khususnya dari genus *Glomus*, berpotensi dikembangkan sebagai agen hayati untuk mendukung pertanian berkelanjutan di lahan salin. Strategi ini dapat menjadi pendekatan agroekologis yang murah, ramah lingkungan, dan berkelanjutan untuk meningkatkan produksi tanaman di lahan marginal seperti wilayah Nusa Tenggara Timur.



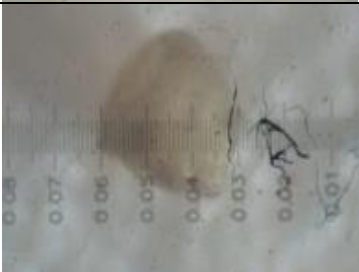

3. Karakteristik Spora FMA

Karakteristik spora FMA dari lokasi pengambilan sampel pada tanah salin dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Karakteristik spora FMA dari lokasi pengambilan sampel

Tipe Spora	Gambar	Deskripsi
1 Kuning		Bentuk bulat, permukaan halus mengkilap, warna kuning ukuran 150 μm

Tabel 3. Karakteristik spora FMA dari lokasi pengambilan sampel

Tipe Spora	Gambar	Deskripsi
2. Hitam		Bentuk bulat, permukaan halus mengkilap, warna putih ukuran 150 μm
1. Orange		Bentuk bulat, permukaan kasar, warna orange ukuran 150 μm
2. Putih		Bentuk bulat, permukaan halus, warna putih ukuran 150 μm
3. Merah kehitaman		Bentuk bulat, permukaan halus mengkilap, warna merah ukuran 150 μm ,

Kemampuan Isolat Spora Mikoriza Asal Rizosfer Tanaman Pada Tanah Salin Di Kabupaten Kupang Dalam Memperbanyak Spora Dan Meningkatkan Pertumbuhan Tanaman Sorgum

Penelitian menunjukkan bahwa inokulasi Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA) dari lima tipe spora (kuning, oranye, hitam, putih, kemerahan) secara signifikan mempengaruhi kepadatan spora pada rizosfer sorgum dan parameter pertumbuhan tanaman 8 minggu setelah tanam (MST).

1. Densitas spora (rata-rata jumlah spora per 100 g tanah) dari rizosfer Sorgum

Setelah berhasil mengidentifikasi tipe-tipe spora Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA) yang dominan dan potensial dari tanah salin di Kabupaten Kupang, langkah berikutnya dalam penelitian ini adalah mengevaluasi kemampuan masing-masing tipe spora dalam memperbanyak diri menggunakan tanaman sorgum (*Sorghum bicolor* L.) sebagai inang. Pemilihan tanaman sorgum didasarkan pada beberapa pertimbangan agronomis dan ekologis. Sorgum merupakan tanaman pangan penting yang dikenal memiliki toleransi cukup tinggi terhadap kondisi lingkungan ekstrem, seperti kekeringan dan salinitas. Hal ini menjadikannya tanaman yang sangat cocok untuk dikembangkan di lahan marginal, khususnya di wilayah Nusa Tenggara Timur yang didominasi oleh tanah salin dan kering. Lebih dari itu, sorgum juga diketahui memiliki kemampuan yang baik dalam membentuk hubungan simbiotik dengan FMA, menjadikannya kandidat ideal untuk studi perbanyakan dan efektivitas FMA di lapangan.

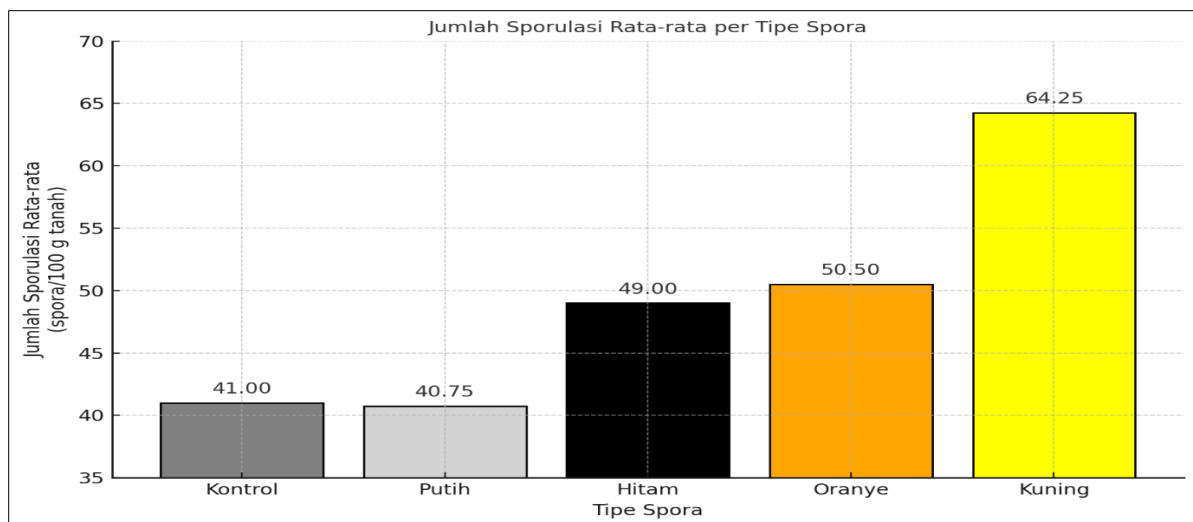
Percobaan dilakukan dalam polibag berukuran 5 kg, menggunakan media tanam berupa tanah salin yang diambil langsung dari Desa Oebelo. Media tanah tersebut tidak mengalami proses

sterilisasi, dengan tujuan mempertahankan keberadaan mikroorganisme alami yang mencerminkan kondisi sesungguhnya di lapangan. Hal ini penting untuk menilai bagaimana interaksi antara FMA yang diinokulasikan dan komunitas mikroba asli tanah berlangsung dalam kondisi alami. Setiap polibag diisi dengan 3 kg tanah, lalu diinokulasikan dengan 25 spora FMA dari masing-masing tipe (kuning, oranye, putih, hitam, dan kemerahan) yang ditaburkan di sekitar lubang tanam sebelum benih sorgum ditanam. Jumlah spora yang digunakan memang tergolong kecil, namun cukup untuk memulai proses kolonisasi akar dan memperbanyak spora baru.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa tipe spora kuning (tipe 1) menghasilkan jumlah sporulasi tertinggi, yaitu rata-rata 64,25 spora per 100 gram tanah. Diikuti oleh tipe spora oranye (tipe 3) dengan rata-rata 50,5 spora, dan tipe hitam (tipe 2) sebesar 49 spora per 100 gram tanah. Sementara itu, tipe putih (tipe 4) menunjukkan jumlah sporulasi terendah, yaitu hanya 40,75 spora per 100 gram tanah. Angka ini bahkan tidak berbeda jauh dengan perlakuan kontrol (tanpa inokulasi), yang mencatatkan rata-rata 41 spora per 100 gram tanah. Fenomena ini terjadi karena tanah yang digunakan tidak disterilisasi, sehingga masih mengandung spora asli dari lokasi pengambilan sampel. Spora yang dominan di tanah asal ternyata adalah spora tipe kuning dan oranye, sehingga meskipun tidak diinokulasikan, sporulasi tetap terjadi pada perlakuan kontrol.

Berdasarkan data ini, dapat disimpulkan bahwa tipe spora kuning dan oranye memiliki kemampuan adaptasi dan sporulasi yang tinggi di lingkungan tanah salin dengan nilai DHL (daya hantar listrik) sebesar 11 mmhos. Tingkat salinitas seperti ini tergolong tinggi dan berpotensi menurunkan viabilitas spora, pertumbuhan hifa, dan pembentukan struktur mikoriza seperti arbuskula dan vesikel. Namun, tipe kuning dan oranye mampu menunjukkan kolonisasi yang baik, yang menandakan ketahanannya terhadap tekanan lingkungan tersebut.

Literatur menunjukkan bahwa salinitas dapat menurunkan kapasitas kolonisasi FMA pada akar tanaman serta menurunkan produksi struktur mikoriza (Malik et al., 2024). Di lahan salin, genus *Glomus* tetap menjadi dominan karena adaptasinya yang tinggi terhadap cekaman salinitas, namun secara umum, tingkat salinitas yang tinggi tetap menurunkan kepadatan spora dan kolonisasi akar (Jiang et al., 2025). Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa spora FMA tipe kuning dan oranye sangat potensial untuk dikembangkan sebagai bioinokulan pada lahan-lahan marginal yang mengalami salinitas tinggi. Aplikasi teknologi hayati ini bukan hanya meningkatkan efektivitas kolonisasi mikoriza. Hasil pengamatan sporulasi spora terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Jumlah sporulasi rata-rata per tipe spora FMA

2. Tinggi tanaman dan jumlah daun Sorgum 8 Minggu Setelah Tanam (MST)

a) Tinggi Tanaman Sorgum 8 MST

Hasil penelitian menunjukkan bahwa inokulasi FMA, khususnya tipe spora oranye dan kuning, mampu meningkatkan tinggi tanaman sorgum secara signifikan dibandingkan kontrol. Rata-rata tinggi tanaman pada perlakuan spora oranye mencapai 79 cm, lebih tinggi 7 cm dari kontrol (72 cm). Meskipun selisih ini tampak moderat, secara fisiologis peningkatan tersebut mencerminkan respons positif terhadap kolonisasi mikoriza, terutama dalam kondisi tanah salin yang umumnya menghambat pertumbuhan vegetatif. Tinggi tanaman merupakan parameter agronomis penting yang dapat digunakan sebagai indikator respons fisiologis terhadap perlakuan dan kondisi lingkungan.

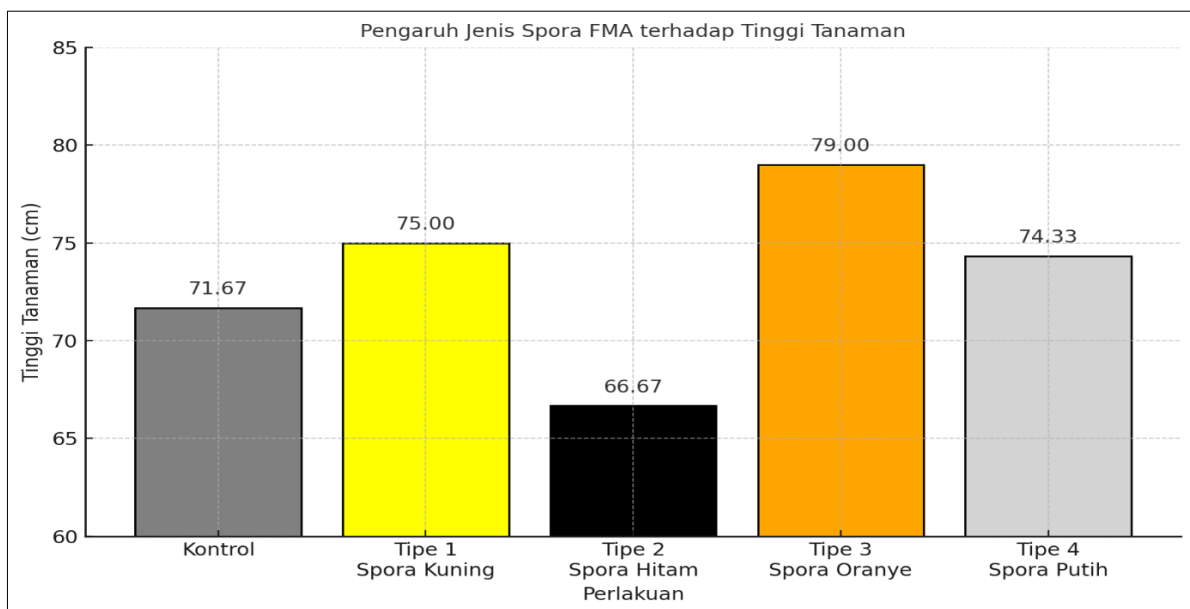
Faktor-faktor seperti ketersediaan air dan unsur hara, terutama nitrogen (N) dan fosfor (P), sangat memengaruhi pertumbuhan vegetatif tanaman. Inokulasi FMA dapat memperbaiki penyerapan hara makro maupun mikro, memperluas permukaan serapan akar, dan meningkatkan efisiensi penggunaan nutrisi, sehingga berdampak positif pada pertumbuhan tanaman.

Jika dibandingkan dengan studi Fitria et al. (2022) yang melaporkan peningkatan tinggi tanaman sorgum sebesar 12–15% melalui inokulasi FMA dalam sistem fertigasi datar, maka peningkatan 9,7% pada perlakuan spora oranye dalam studi ini menunjukkan efektivitas yang sebanding meskipun dilakukan di tanah marginal tanpa sistem irigasi intensif. Sementara itu, Rizki et al. (2025) mencatat peningkatan tinggi tanaman sebesar 10,2% pada tanah salin dengan DHL 10–12 mmhos/cm, mendekati kondisi dalam penelitian ini (DHL 11 mmhos/cm), sehingga memperkuat validitas temuan.

Mekanisme biologis toleransi salinitas melalui FMA adalah simbiosis FMA dan sorgum berperan penting dalam meningkatkan toleransi terhadap tekanan osmotik dan ionik. Hifa eksternal FMA memperluas zona eksplorasi akar, memungkinkan penyerapan air dan hara dari pori-pori tanah yang tidak terjangkau oleh akar primer. Dalam kondisi salin, hal ini sangat krusial karena air tanah memiliki potensi osmotik rendah dan distribusi hara tidak merata. Selain itu, FMA meningkatkan aktivitas enzim antioksidan seperti superoksida dismutase (SOD), katalase (CAT), dan peroksidase (POD), yang berfungsi menetralkan spesies oksigen reaktif (ROS) akibat stres salinitas (Shahid et al., 2020). Penurunan kadar prolin yang diamati oleh Rizki et al. (2025) pada tanaman yang diinokulasi FMA menunjukkan bahwa tanaman tidak perlu mengakumulasi osmolit dalam jumlah besar, karena tekanan osmotik telah diredam melalui peningkatan efisiensi serapan air dan stabilisasi ion. FMA juga berkontribusi terhadap keseimbangan ion dalam sel tanaman dengan meningkatkan rasio K^+/Na^+ dan Ca^{2+}/Na^+ , yang penting untuk menjaga integritas membran dan fungsi enzimatik. Mekanisme ini menjelaskan mengapa tanaman pada perlakuan FMA menunjukkan pertumbuhan lebih baik meskipun berada dalam lingkungan yang secara kimiawi menekan.

Temuan ini memperkuat hasil Prihantoro et al. (2023) yang menunjukkan tingkat kolonisasi akar FMA tinggi (80–99%) bahkan di tanah marginal. Namun, studi ini memberikan kontribusi baru dengan membandingkan efektivitas empat tipe spora FMA secara kuantitatif, yang belum banyak dijelaskan dalam literatur sebelumnya. Efektivitas spora oranye dan kuning dalam meningkatkan tinggi tanaman menunjukkan bahwa karakteristik morfologi dan fisiologi spora dapat memengaruhi keberhasilan kolonisasi dan respons tanaman.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memperkuat pemahaman bahwa FMA bukan hanya berperan sebagai agen penunjang pertumbuhan, tetapi juga sebagai mitra ekologis yang vital dalam membentuk ketahanan tanaman terhadap kondisi ekstrem. Oleh karena itu, pengembangan teknologi inokulasi FMA, khususnya tipe spora oranye dan kuning yang terbukti efektif dalam penelitian ini, sangat prospektif untuk diterapkan dalam sistem pertanian berkelanjutan di wilayah lahan marginal seperti Nusa Tenggara Timur. Rerata tinggi tanaman sorgum pada 8 MST berdasarkan perlakuan spora terlihat pada Gambar 4.



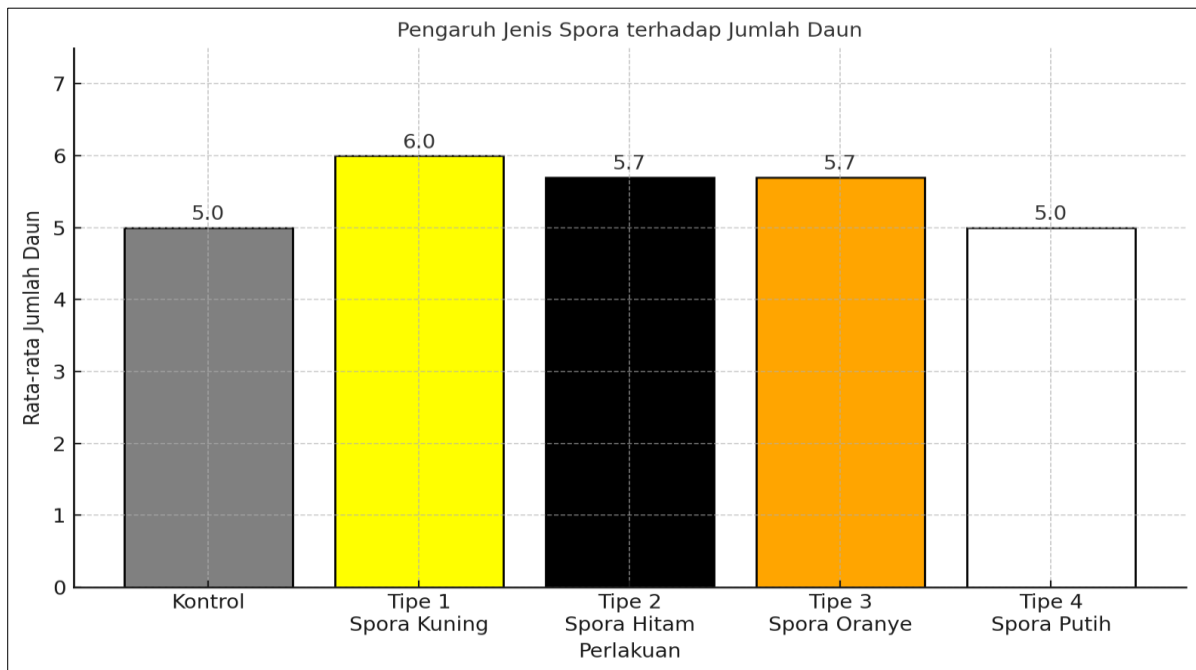
Gambar 4. Tinggi tanaman sorgum pada delapan minggu setelah tanam

b) Jumlah Daun Sorgum 8 MST

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan dengan spora FMA tipe kuning menghasilkan jumlah daun tertinggi (rata-rata 6,0 helai), diikuti oleh tipe hitam dan oranye (masing-masing 5,7 helai), sementara kontrol dan tipe putih menunjukkan jumlah daun terendah (5,0 helai). Meskipun selisihnya tampak kecil secara absolut, perbedaan ini mencerminkan respons fisiologis yang relevan terhadap inokulasi mikoriza.

Jumlah daun merupakan indikator penting dalam menilai kapasitas fotosintetik tanaman, karena berkorelasi langsung dengan luas permukaan daun dan potensi akumulasi biomassa. Peningkatan jumlah daun pada perlakuan spora kuning menunjukkan bahwa tipe ini tidak hanya mendukung pertumbuhan tinggi tanaman (75 cm), tetapi juga memperkuat perkembangan kanopi vegetatif. Hal ini sejalan dengan temuan Haghshenas et al. (2024) yang menyatakan bahwa FMA dapat meningkatkan jumlah daun dan hasil panen melalui peningkatan serapan P dan efisiensi air.

Rerata jumlah daun sorgum berdasarkan perlakuan spora dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Jumlah daun sorgum pada delapan minggu setelah tanam

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan dari penelitian ini, yaitu penelitian ini berhasil mengidentifikasi lima tipe spora Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA) di rizosfer tanaman pada tanah salin Kabupaten Kupang, yaitu spora kuning, oranye, putih, hitam, dan kemerahan. Spora kuning dan oranye menunjukkan dominasi dan potensi adaptasi terbaik terhadap lingkungan salin berdasarkan densitas, kelimpahan relatif, dan karakter morfologi. Spora kuning dan oranye memiliki kemampuan memperbanyak diri (sporulasi) paling tinggi pada media tanah salin setelah inokulasi pada tanaman sorgum. Perlakuan inokulasi dengan kedua tipe spora tersebut juga signifikan meningkatkan pertumbuhan tanaman, ditandai dengan tinggi tanaman dan jumlah daun yang lebih baik dibandingkan kontrol dan tipe spora lainnya. Disarankan dilakukan identifikasi molekuler lebih lanjut untuk memastikan spesies dominan FMA, pengujian skala lanjut di rumah kaca dan lapang, serta pengembangan aplikasi FMA lokal untuk tanaman sereal lain yang toleran lahan salin, guna mendukung pertanian berkelanjutan pada lahan marginal di wilayah tersebut.

REFERENSI

Agustini, F., Sembiring, M. B., & Damanik, R. I. (2024). Pengaruh Aplikasi Fungi Mikoriza Arbuskula (*Glomus* sp.) dan Giberelin terhadap Pertumbuhan Fase Vegetatif Tanaman Porang (*Amorphophallus oncophyllus*) di Tanah Ultisol. *Agrikultura*, 35(2), 321–330.

- <https://doi.org/10.24198/agrikultura.v35i2.55289>
- Bağ, E., & Kocaman, B. (2024). Effects of mycorrhizal fungi application on some growth parameters of Monterey strawberry cultivars under different salt stress conditions. *International Journal of Agriculture, Environment and Food Sciences*. <https://doi.org/10.31015/jaefs.2024.1.16>
- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., Ahmed, N., & Zhang, L. (2019). Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Plant Growth Regulation: Implications in Abiotic Stress Tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 10(September), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068>
- Boorboori, M. R., & Lackóová, L. (2024). Arbuscular mycorrhizal fungi and salinity stress mitigation in plants. *Frontiers in Plant Science*, 15(January), 1–20. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1504970>
- Chowdhary, N. A., & Songachan, L. S. (2025). Boosting sustainable agriculture by arbuscular mycorrhizal fungi under abiotic stress conditions. *Plant Stress*, 17, 100945. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.100945>
- Dastogeer, K. M. G., Zahan, M. I., Tahjib-Ul-Arif, M., Akter, M. A., & Okazaki, S. (2020). Plant Salinity Tolerance Conferred by Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Associated Mechanisms: A Meta-Analysis. *Frontiers in Plant Science*, 11(December). <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.588550>
- Fitria, A., Abdullah, L., & Karti, P. D. M. H. (2022). Pertumbuhan dan Produksi Sorgum bicolor pada Kultur Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA) dengan Sistem Fertigasi dan Fortifikasi Nutrisi Berbeda. *Jurnal Ilmu Nutrisi Dan Teknologi Pakan*, 20(2), 51–57. <https://doi.org/10.29244/jintp.20.2.51-57>
- Haghshenas, M., Van Delden, S., & Nazaridellou, M. (2024). Effects of nutrient solution strength, PGPB, and mycorrhizal inoculation on growth, yield, and quality of strawberry. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. <https://doi.org/10.55730/1300-011x.3189>
- Jiang, D., Yan, Y., Li, J., Zhang, C., Huangfu, S., Sun, Y., Sun, C., Huang, L., & Tian, L. (2025). Arbuscular Mycorrhizal Fungi Play More Important Roles in Saline–Sodic Soil than in Black Soil of the Paddy Field in Northeast China. *Agriculture*. <https://doi.org/10.3390/agriculture15090951>
- Kakabouki, I., Stavropoulos, P., Roussis, I., Mavroeidis, A., & Bilalis, D. (2023). Contribution of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) in Improving the Growth and Yield Performances of Flax (*Linum usitatissimum* L.) to Salinity Stress. In *Agronomy* (Vol. 13, Issue 9). <https://doi.org/10.3390/agronomy13092416>
- Ma, Y., Zheng, C., Bo, Y., Song, C., & Zhu, F. (2024). Improving crop salt tolerance through soil legacy effects. *Frontiers in Plant Science*, 15(May), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1396754>
- Malik, J. A., Alqarawi, A. A., Alotaibi, F., Habib, M. M., Sorrori, S. N., Almutairi, M. B. R., & Dar, B. A. (2024). Alleviation of NaCl Stress on Growth and Biochemical Traits of *Cenchrus ciliaris* L. via Arbuscular Mycorrhizal Fungi Symbiosis. *Life*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/life14101276>
- Malik, J. A., AlQarawi, A. A., Dar, B. A., Hashem, A., Alshahrani, T. S., AlZain, M. N., Habib, M. M., Javed, M. M., & Abd_Allah, E. F. (2022). Arbuscular Mycorrhizal Fungi Isolated from Highly Saline “Sabkha Habitat” Soil Alleviated the NaCl-Induced Stress and Improved *Lasiurus scindicus* Growth. In *Agriculture* (Vol. 12, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/agriculture12030337>
- Morton, J. B., & Benny, G. L. (1990). Revised classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Zygomycetes): a new order, Glomales, two new suborders, Glomineae and Gigasporineae, and two new families, Acaulosporaceae and Gigasporaceae, with an emendation of Glomaceae. *Mycotaxon*, 37, 471–491. <https://www.biodiversitylibrary.org/part/416851>
- Nie, W., He, Q., Guo, H., Zhang, W., Ma, L., Li, J., & Wen, D. (2024). Arbuscular Mycorrhizal Fungi: Boosting Crop Resilience to Environmental Stresses. In *Microorganisms* (Vol. 12, Issue 12). <https://doi.org/10.3390/microorganisms12122448>
- Pooja, P., Tallapragada, S., Lamba, A., & Punia, S. (2025). Role played by arbuscular mycorrhizal fungi in amelioration of salinity stress: a review. *Plant and Soil*, 511(1), 27–42. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06976-1>
- Pramukyana, L., Restanto, D. P., & Wijaya, K. A. (2021). Respon Tanaman Sorgum (*Sorghum bicolor* L.) Pada Tingkat Cekaman Salinitas Dengan Aplikasi Kalsium. *Agriprima: Journal of Applied Agricultural Sciences*, 5(2), 86–96. <https://doi.org/10.25047/agriprima.v5i2.418>
- Prihantoro, I., Karti, P. D., Aditia, E. L., & Nisabillah, S. (2023). Kualitas Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA) yang Diproduksi dengan Teknik Fortifikasi dan Fertigasi Berbeda pada Pertumbuhan *Indigofera zollingeriana*. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 28(3), 377–385. <https://doi.org/10.18343/jipi.28.3.377>

- Rahmad, Zainal, A., & Anwar, A. (2025). Identification and Diversity of Mycorrhizae in Several Rhizospheres of Plant Vegetation in Ultisol Land. *Jurnal Agronomi Tanaman Tropika (Juatika)*, 7(1). <https://doi.org/10.36378/juatika.v7i1.3802>
- Rajabi Dehnavi, A., Zahedi, M., & Piernik, A. (2023). Understanding salinity stress responses in sorghum: exploring genotype variability and salt tolerance mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 14(January). <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1296286>
- 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(7), 515–531. <https://doi.org/10.1007/s00572-013-0486-y>
- Rizki, A., Manu Hara Karti, P. D., Prihantoro, I., Mudastir, Yaman, M. A., & Ilham. (2025). Pengaruh Penggunaan Fungi Mikoriza Arbuskula terhadap Produksi dan Karakteristik Fisiologis Lamtoro Mini (*Desmanthus virgatus*) pada Tanah Salin. *Jurnal Ilmu Nutrisi Dan Teknologi Pakan*, 23(1), 49–56. <https://doi.org/10.29244/jintp.23.1.49-56>
- Setiawati, M. R. N. K., Pirda, N., Anas, Ramdhani, Suryatmana, Pujawati, Herdiyantoro, D., Simarmata, T., & Natalie, F. B. (2023). Pengaruh Pupuk Hayati dan Briket Amelioran terhadap Pertumbuhan Tanaman Padi pada Tanah Salin. *Journal Agroekotek*, 15(1), 1–15.
- Shahid, M., Sarkhosh, A., Khan, N., Balal, R., Ali, S., Rossi, L., Gómez, C., Mattson, N., Nasim, W., & García-Sánchez, F. (2020). Insights into the Physiological and Biochemical Impacts of Salt Stress on Plant Growth and Development. *Agronomy*, 10(7), 938. <https://doi.org/10.3390/agronomy10070938>
- Tarigan, D. M., Barus, W. A., Munar, A., & Dkk, A. L. (2024). *Teknik Budidaya Sorgum di Tanah Salin*. <https://books.google.co.id/books?id=urn4EAAAQBAJ>
- Teshale, E. (2023). The Impacts of Salt-Affected Soil on Soil and Plant Growth and Management Options with Organic and Inorganic Amendments: A Review. *Journal of Natural Sciences Research*, 14(10), 7–13. <https://doi.org/10.7176/jnsr/14-10-02>
- Usnawiyah, U., Khaidir, K., Yusuf N, M., & Sari Dewi, E. (2021). Pemanfaatan Lahan Salin Tadah Hujan Untuk Budidaya Sorgum. *Journal Agrium*, 18(1), 46–51. <https://doi.org/10.29103/agrium.v18i1.3841>
- Walker, C., Vestberg, M., Demircik, F., Stockinger, H., Saito, M., Sawaki, H., Nishimura, I., & Schüßler, A. (2007). Molecular phylogeny and new taxa in the Archaeosporales (Glomeromycota): *Ambispora fennica* gen. sp. nov., *Ambisporaceae* fam. nov., and emendation of *Archaeospora* and *Archaeosporaceae*. *Mycological Research*, 111(2), 137–153. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mycres.2006.11.008>
- Wang, Q., Liu, M., Wang, Z., Li, J., Liu, K., & Huang, D. (2024). The role of arbuscular mycorrhizal symbiosis in plant abiotic stress. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1323881>
- 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. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1438771>