

Respons Tanaman Sorgum atas Aplikasi Mikoriza Arbuskula pada Gradien Konsentrasi N dan P (Sorghum Response to Arbuscular Mycorrhiza Application in N and P Concentration Gradients)

Devanda Ayu Lidya Permata Putri^{1*}, Rahayu Widyastuti¹, Idris Idris², Azra Zahrah Nadhirah Ikhwani², Satya Nugroho³, I Made Sudiana², Atit Kanti⁴, Masaru Kobayashi⁵

(Diterima Agustus 2022/Disetujui Desember 2022)

ABSTRAK

Tanaman sorgum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] merupakan tanaman pangan multiguna yang dapat beradaptasi dengan perubahan iklim. Peningkatan produktivitas tanaman sorgum dapat dicapai melalui aplikasi pupuk kimia serta fungsi mikoriza arbuskula (FMA). Oleh sebab itu, penelitian ini bertujuan menilai aplikasi FMA sehubungan dengan gradien konsentrasi N dan P guna mendukung pertumbuhan tanaman sorgum aksesori Super 2 dan Konawe Selatan (KS). Media tanam yang digunakan adalah zeolit steril (kasar dan halus). Pada setiap pot, diinokulasikan FMA, yaitu *Glomus mosseae* sebanyak 40 spora. Percobaan disusun berdasarkan rancangan acak kelompok dengan 40 perlakuan dan 3 ulangan. Gradien konsentrasi N dan P diragamkan dengan menggunakan taraf dosis pupuk N (urea) dan P (*triple superphosphate*, TSP) 12,5%; 50%; 75%; 100%; dan 125%. Analisis ragam dilakukan menggunakan perangkat lunak SAS 9.0 dengan taraf 5% dan hasil yang berbeda nyata dilanjutkan dengan uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT). Terdapat perbedaan respons pada kedua aksesori. Aplikasi FMA serta pupuk urea 50% dan TSP 75% pada aksesori Super 2 memiliki tinggi dan biomassa tanaman tertinggi daripada perlakuan lainnya, sedangkan pada aksesori KS terjadi pada aplikasi FMA serta urea 50% dan TSP 50%. Namun, peningkatan pertumbuhan kedua aksesori tanaman sorgum tidak berkorelasi dengan kolonisasi dan panjang akar yang dapat diketahui bahwa hasil tertinggi terdapat pada pemberian dosis urea 12,5% dan TSP 12,5%. Aplikasi FMA secara nyata dapat meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk urea dan TSP mencapai 50% dibandingkan kontrol positif (urea dan TSP 100%) serta menunjang pertumbuhan tanaman sorgum pada kedua aksesori.

Kata kunci: aksesori Konawe Selatan, aksesori Super 2, *Glomus mosseae*, TSP, urea

ABSTRACT

Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] is a multipurpose food crop that can adapt to climate change. Sorghum productivity can be increased by applying chemical fertilizers and arbuscular mycorrhiza fungi (AMF). This research aimed to assess the effect of AMF application and N and P concentration gradients to support Super 2 and KS sorghum accession growth. The plants were grown in a sterilized zeolite (coarse and fine) and inoculated with *Glomus mosseae* 40 spores per pot. The experimental design was a randomized complete block design with 40 treatments and three replications. N and P concentration gradient treatments were carried out using a dose level of fertilizer N (urea) and P (TSP) at 12,5%; 50%; 75%; 100%; and 125%. Analysis of variance was carried out using SAS 9.0 software at a level of 5%, and the results were significantly different, followed by DMRT. The application of AMF and urea 50% and TSP 75% in Super 2 accessions and urea 50% and TSP 50% in KS accessions gave the highest plant height and biomass. However, the increase in sorghum growth did not correlate with root colonization and root length, which could be seen that the highest in both accessions were obtained at urea 12,5% and TSP 12,5%. The application of AMF can significantly lower the use of urea and TSP fertilizers by up to 50% compared to a positive control (urea and TSP 100%) and support sorghum growth in both accessions.

Keywords: *Glomus mosseae*, Konawe Selatan accession, Super 2 accession, TSP, urea

PENDAHULUAN

Perubahan iklim yang terjadi pada beberapa dasawarsa terakhir menjadi salah satu faktor pembatas dalam pelaksanaan kegiatan pertanian di seluruh dunia karena berdampak pada menurunnya produktivitas tanaman pertanian. Lebih jauh, perubahan iklim berpotensi melemahkan ketahanan pangan, energi, dan air yang cukup menjadi perhatian besar di Indonesia (Purwanto *et al.* 2021). Untuk mengurangi dampak merugikan dari perubahan iklim diperlukan

¹ Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, IPB University, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680

² Pusat Riset Mikrobiologi Terapan, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Jl. Raya Bogor Km. 46, Bogor 16911

³ Pusat Riset Rekayasa Genetika, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Jl. Raya Bogor Km. 46, Bogor 16911

⁴ Pusat Riset Biosistemika dan Evolusi, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Jl. Raya Bogor Km. 46, Bogor 16911

⁵ Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Kitashirakawa Oiwakecho, Sakyo Ward, Kyoto Japan 606-8502

* Penulis Korespondensi: Email: d.ayulidya@yahoo.com

strategi yang sesuai dan ramah lingkungan. Salah satu upaya untuk menjaga ketahanan pangan dan energi pada skenario perubahan iklim ialah dengan menyeleksi tanaman yang memiliki toleransi dan adaptasi yang baik dengan perubahan iklim (Arteaga *et al.* 2020).

Tanaman sorgum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] dikenal luas sebagai tanaman pangan multiguna yang dapat beradaptasi dengan perubahan iklim dan menempati peringkat ke-5 di dunia dalam kategori tanaman sereal yang dapat dimanfaatkan sebagai pangan, pakan ternak, bioetanol, dan bahan baku industri (Ananda *et al.* 2020). Oleh sebab itu, pemanfaatan sorgum di Indonesia perlu mendapat perhatian karena potensinya yang besar dan dapat menjadi pendukung dalam pelestarian swasembada dan diversifikasi pangan pada skenario perubahan iklim (Zubair 2016).

Aksesi sorgum di Indonesia sangat beragam, begitu pula dengan cirinya yang sangat beragam antara satu dengan lainnya. Terdapat dua aksesi yang menarik untuk diteliti, antara lain aksesi Super 2 dan Konawe Selatan (KS) yang memiliki ciri berbeda. Aksesi Super 2 memproduksi biji dalam jumlah tinggi dan umumnya dimanfaatkan sebagai penghasil bioetanol, sedangkan aksesi KS mengandung lignin yang tinggi sehingga dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku industri (Subagio & Aqil 2014; Suwarti *et al.* 2018; Astuti *et al.* 2019).

Peningkatan produktivitas tanaman sorgum dapat dicapai dengan memenuhi kebutuhan hara melalui aplikasi pupuk kimia. Namun, penggunaan pupuk kimia secara terus menerus dapat berdampak negatif bagi lingkungan seperti pencemaran tanah, perubahan keanekaragaman hayati, eutrofikasi, kontaminasi air, dan mengurangi efisiensi penggunaan pupuk. Lebih lanjut, pemakaian pupuk kimia yang tidak efisien menyebabkan terganggunya kesehatan manusia (Bai *et al.* 2020). Manajemen yang tepat dan ramah lingkungan dapat diterapkan untuk meningkatkan efisiensi pupuk kimia yang diaplikasikan pada tanaman sorgum, salah satunya dengan menggunakan fungi mikoriza arbuskula (FMA).

Mikoriza adalah hubungan simbiotik antara kelompok fungi tanah dan tanaman (Rani *et al.* 2017). Pada penelitian sebelumnya diketahui bahwa inokulan FMA yang efektif dapat menjadi pupuk hayati untuk tanaman sorgum sehingga dapat meningkatkan produksi tanaman dan mendukung pertanian berkelanjutan (Nakmee *et al.* 2016). Hara nitrogen (N) dan fosfor (P) serta simbiosis FMA dengan tanaman inang berperan penting dalam meningkatkan aktivitas enzim untuk metabolisme N dan P sehingga dapat meningkatkan ketersediaan hara (Rani *et al.* 2017). Namun, belum diketahui lebih lanjut terkait aplikasi FMA serta hara N dan P pada dosis optimum guna meningkatkan produksi tanaman sorgum. Oleh sebab itu, penelitian ini bertujuan menilai pengaruh aplikasi FMA berdasarkan gradien konsentrasi N dan P guna

mendukung pertumbuhan dua aksesi tanaman sorgum.

METODE PENELITIAN

Fungi Mikoriza Arbuskula dan Benih Tanaman Sorgum

FMA yang digunakan ialah *Glomus mosseae* yang merupakan koleksi SEAMEO Biotrop, Bogor. Benih sorgum yang digunakan ialah *Sorghum bicolor* (L.) Moench aksesi Super 2 dan aksesi KS yang diperoleh dari Balai Penelitian Tanaman Sereal. Sebelum ditanam, benih disterilkan terlebih dahulu menggunakan NaOCl 1% (v/v) selama 10 menit lalu dibilas 3 kali menggunakan akuades steril (Devnarain *et al.* 2016). Benih sorgum steril kemudian diletakkan pada kertas saring yang ditempatkan pada cawan petri dan telah disemprotkan dengan akuades steril hingga kondisi lembap. Germinasi dilakukan selama 2 hari hingga akar tumbuh (Ramadhani *et al.* 2019).

Uji Gradien Konsentrasi N dan P pada Tanaman Sorgum

Penelitian dilaksanakan di Rumah Kaca yang terletak di Pusat Riset Mikrobiologi Terapan, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Cibinong, Jawa Barat. Media tanam yang digunakan adalah zeolit kasar dan zeolit halus dengan nisbah 3:1 yang telah disterilkan menggunakan autoklaf pada suhu 121°C selama 60 menit (A'isyah *et al.* 2019). Benih sorgum yang telah digermisasi kemudian dipindahkan ke 200 g media tanam zeolit yang berwadahkan pot dengan ukuran 5,5 cm × 5,5 cm × 12 cm. Pada satu lubang pot ditanam sebanyak 1 benih tanaman. FMA yang ada di dalam bahan pembawa zeolit kemudian diinokulasikan di sekitar akar tanaman sorgum sebanyak 40 spora per tanaman (Ramadhani *et al.* 2019). Tanaman dipanen 7 pekan setelah tanam (MST).

Selama penanaman, hara diberikan melalui pemupukan pupuk kimia N (urea) dan P (TSP) serta larutan Hoagland. Pada pekan pertama penanaman, diberikan larutan Hoagland dengan komposisi larutan makronutrien yang terdiri atas $\text{CaNO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 9,45 g; KNO_3 6,07 g; dan $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 1,15 g yang dilarutkan dalam 750 mL akuades, dan $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 4,93 g yang dilarutkan dalam 250 mL akuades. Komposisi larutan mikronutrien terdiri atas NaFe-EDTA 2 g; H_3BO_3 0,2860 g; $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0,2130 g; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,0080 g; $\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,0080 g; dan $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_2$ 0,0020 g yang dilarutkan dalam 100 mL akuades. Kemudian, 100 mL larutan makronutrien dan 0,1 mL larutan makronutrien yang sudah disterilkan dengan menggunakan autoklaf pada suhu 121°C selama 60 menit, dilarutkan dalam 900 mL akuades steril dan dihomogenkan. Larutan yang telah homogen kemudian disesuaikan pHnya hingga mencapai 5,7. Larutan Hoagland diaplikasikan pada tanaman dengan cara menyiramnya sesuai dengan 70% kapasitas

lapangan dan diberikan sebanyak 2 kali selama pekan pertama penanaman.

Untuk pemupukan, taraf pupuk urea dan TSP yang digunakan pada penelitian adalah 12,5%; 50%; 75%; 100%; dan 125% dosis acuan. Dosis acuan 100% mengacu pada dosis optimum untuk mendukung pertumbuhan tanaman sorgum pada penelitian Suminar *et al.* (2017), yaitu 160,4 kg N ha⁻¹ dan 43,7 kg P₂O₅ ha⁻¹. Selain itu, diaplikasikan pula pupuk K (KCl) sebagai pupuk dasar berdasarkan dosis acuan 100%, yaitu 124,9 kg K₂O ha⁻¹ (Suminar *et al.* 2017). Pupuk diaplikasikan sebanyak 3 kali dengan pemberian 1/3 dosis pada setiap pemupukan (Abdelhameid 2020). Tanaman disiram setiap hari menggunakan air ledeng mengacu pada kondisi 70% kapasitas lapangan (Wang *et al.* 2019). Selama penanaman, kelembapan dan suhu di rumah kaca diukur menggunakan *thermo-hygrometer*.

Penelitian ini menerapkan Rancangan Acak Kelompok (RAK) dengan perlakuan yang terdiri atas kombinasi 3 variabel, yaitu aksesori sorgum, gradien konsentrasi N dan P, dan FMA. Aksesori sorgum terdiri atas A = aksesori Super 2 dan B = aksesori KS; gradien konsentrasi N dan P terdiri atas NP0 = kontrol, NP1 = TSP 125%, NP2 = TSP dan urea 100%, NP3 = TSP 75%, NP4 = TSP 50%, NP5 = TSP 12,5%, NP6 = urea 125%, NP7 = urea 75%, NP8 = urea 50%, dan NP9 = urea 12,5%; serta FMA yang terdiri atas M0 = tanpa FMA dan M1 = dengan FMA. Dari kombinasi ketiga variabel tersebut didapatkan 40 perlakuan dan dengan 3 ulangan maka didapatkan 120 unit percobaan.

Analisis Kolonisasi Akar Tanaman Sorgum

Sampel akar dan pewarnaan akar disiapkan menggunakan metode Brundrett *et al.* (1996) dan Koske dan Gemma (1989) yang telah dimodifikasi. Sampel akar dengan total panjang 30 cm dibersihkan menggunakan air. Akar diwarnai dengan merendamnya dalam larutan KOH 10% (b/v) yang dipanaskan pada *dry block heater* pada suhu 90°C selama 30 menit. Sampel akar kemudian dibersihkan menggunakan air dengan membilasnya sebanyak 3 kali, lalu direndam pada larutan HCl 1% (v/v) selama 30 menit. Sampel kemudian direndam menggunakan biru tripan yang dilarutkan dalam laktogliserol hingga konsentrasi 0,05% (b/v) dengan dipanaskan pada suhu 90°C selama 30 menit. Selanjutnya, sampel dibersihkan dari pewarna dengan merendamnya dalam laktogliserol hingga waktu pengamatan.

Kolonisasi akar tanaman sorgum oleh FMA diukur menggunakan *slide method* (Giovannetti dan Mosse 1980), yaitu potongan akar yang telah diwarnai dengan panjang sekitar 1 cm dipilih secara acak dan disusun pada kaca objek yang telah dibagi menjadi 10 segmen.

Penyusunan tersebut diulang sebanyak 3 kali. Akar yang telah tersusun kemudian diamati menggunakan mikroskop binokuler. Akar dikategorikan terinfeksi oleh FMA apabila terdapat sedikitnya salah satu diantara hifa internal, vesikel, ataupun arbuskula di jaringan akar. Persentase kolonisasi akar dihitung menggunakan sistem skor (Boonlue *et al.* 2012), yaitu skor 0 = tidak ada kolonisasi, skor 1 = kolonisasi <1, skor 2 = kolonisasi 1–10%, skor 3 = kolonisasi 11–50%, skor 4 = kolonisasi 51–90%, dan skor 5 = kolonisasi 91–100%. Persentase kolonisasi akar dihitung dengan rumus berikut:

$$\% \text{ Kolonisasi akar} = \frac{[(90n_5 + 70n_4 + 30n_3 + 30n_2 + n_1) / N] \times 100\%}{}$$

Keterangan:

n_{5,4,3,2,1} = Segmen yang memperoleh skor 5, 4, 3, 2, 1
N = Jumlah segmen akar yang diamati

Pengamatan Agronomi Tanaman Sorgum

Parameter agronomi yang diamati antara lain tinggi tanaman, panjang akar, dan biomassa tanaman yang dibagi menjadi bobot basah dan bobot kering tajuk dan akar. Tinggi tanaman diukur dari pangkal batang hingga ujung daun tertinggi. Panjang akar diukur dari buku (*node*) terakhir (pangkal batang) hingga ujung akar. Bobot basah tajuk dan akar ditimbang menggunakan neraca analitik. Tajuk dan akar yang telah ditimbang selanjutnya dikeringkan dalam oven 80°C selama 24 jam dan kemudian ditimbang untuk mendapatkan bobot kering tajuk dan akar tanaman sorgum. Tinggi tanaman diukur pada 1 MST hingga 7 MST, sedangkan panjang akar, bobot basah, dan bobot kering tanaman diukur setelah pemanenan, yaitu 7 MST.

Analisis Data

Data dianalisis menggunakan perangkat lunak SAS 9.0 dengan taraf 5% berdasarkan rancangan acak kelompok (RAK). Hasil analisis ragam yang berbeda nyata dilanjutkan dengan uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Mikroklimat di Rumah Kaca

Selama penelitian, mikroklimat di rumah kaca berfluktuasi dengan rata-rata suhu udara 35,76°C dan rata-rata kelembapan udara 21,50% (Tabel 1). Maiti (1996) menyatakan bahwa kisaran suhu rata-rata untuk pertumbuhan optimum tanaman sorgum adalah 26–34°C pada fase pertumbuhan vegetatif. Sementara itu, kelembapan relatif optimum untuk pertumbuhan

Tabel 1 Suhu dan kelembapan udara di rumah kaca

Parameter	Rata-rata	Maksimum	Minimum
Suhu udara (°C)	35,76 ± 2,15	38,30	33,10
Kelembapan udara (%)	21,50 ± 4,04	28,00	18,00

Keterangan: Bilangan adalah rata-rata ± SED.

sorgum berkisar 20–40%. Rata-rata kelembapan udara yang diamati termasuk ke dalam kelembapan optimum untuk mendukung pertumbuhan tanaman sorgum. Rata-rata suhu udara sedikit lebih tinggi di atas suhu optimum. Walaupun demikian, tidak ada dampak yang berarti pada pertumbuhan sorgum karena masih dalam kisaran suhu optimum.

Pertumbuhan Tanaman

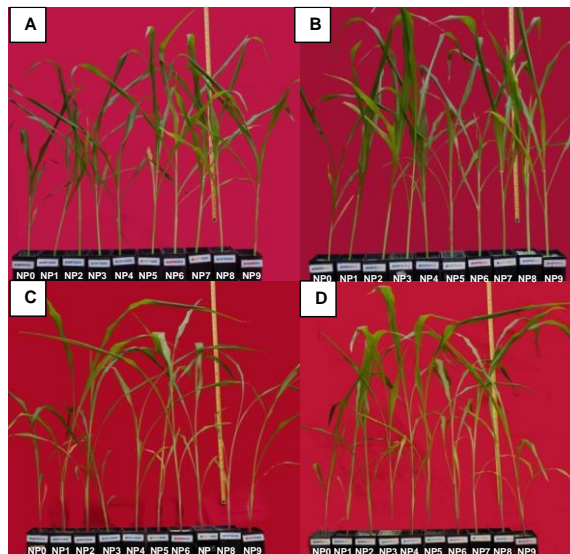
Pada aksesori Super 2 pemupukan dengan dosis urea 50% dan TSP 75% serta aplikasi FMA menunjukkan tinggi tanaman tertinggi, sedangkan pada aksesori KS pemupukan dengan dosis urea 50% dan TSP 50% serta aplikasi FMA menghasilkan tinggi tanaman tertinggi (Tabel 2). Simbiosis FMA dan tanaman dengan aksesori atau genotipe yang beragam memungkinkan timbulnya respons yang beragam pada pertumbuhan dan perolehan nutrisi. Aplikasi FMA lebih efektif menurunkan penggunaan pupuk pada sorgum aksesori KS berdasarkan pertambahan tinggi tanaman,

yaitu mencapai 50% dibandingkan kontrol positif (urea dan TSP 100%). Heijden *et al.* (2015) menyatakan bahwa FMA memfasilitasi penyerapan hara seperti N dan P dengan meningkatkan luas permukaan penyerapan hara dan memobilisasi hara ke tanaman inang. FMA memperluas jaringan penyerapan di luar zona deplesi hara yang terdapat di rizosfer. Hifa FMA yang lebih tipis dibandingkan akar memungkinkan FMA menembus pori-pori yang lebih kecil dan mampu menyerap lebih banyak nutrisi (Diagne *et al.* 2020). Peningkatan penyerapan hara oleh FMA, khususnya hara N akan mengarah pada pertambahan tinggi tanaman (Zaman *et al.* 2021). Selain N, P juga turut mendukung pertumbuhan tanaman sorgum. Malhotra *et al.* (2018) menyatakan bahwa hara P merupakan unsur penting yang memengaruhi pertumbuhan tanaman mulai dari tingkat seluler hingga keseluruhan tanaman, yang dapat diketahui berdasarkan pertambahan tinggi tanaman, jumlah daun, dan biomassa kering tajuk. Pertumbuhan kedua aksesori tanaman sorgum pada 7 MST disajikan pada Gambar 1.

Tabel 2 Pengaruh aplikasi Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA) pada tinggi tanaman sorgum aksesori Super 2 dan Konawe Selatan

Dosis pupuk	Tinggi tanaman (cm)			
	Aksesori Super 2		Aksesori Konawe Selatan	
	FMA	Tanpa FMA	FMA	Tanpa FMA
Kontrol	82,00 ± 6,43 abc	61,33 ± 2,40 f	95,17 ± 3,72 cde	71,33 ± 2,73 g
TSP 12,5%	83,17 ± 0,17 abc	68,00 ± 5,50 ef	99,33 ± 2,33 bcde	80,67 ± 3,38 fg
TSP 50%	85,00 ± 2,78 abc	69,67 ± 6,39 def	108,33 ± 2,91 ab	88,00 ± 1,00 ef
TSP 75%	87,50 ± 0,76 ab	75,67 ± 2,33 bcde	106,67 ± 2,60 abc	90,33 ± 1,67 ef
TSP 125%	82,67 ± 3,18 abc	75,67 ± 2,33 bcde	96,00 ± 2,08 cde	94,33 ± 4,48 de
TSP dan Urea 100%	83,83 ± 2,77 abc	80,00 ± 8,33 bcd	104,00 ± 0,58 abcd	93,00 ± 7,77 de
Urea 12,5%	82,33 ± 2,85 abc	65,67 ± 1,33 ef	97,00 ± 3,00 bcde	75,00 ± 1,73 g
Urea 50%	92,33 ± 1,33 a	68,33 ± 3,18 def	112,00 ± 3,51 a	87,67 ± 6,67 ef
Urea 75%	86,67 ± 2,03 abc	75,00 ± 1,53 cde	104,33 ± 4,33 abcd	89,67 ± 4,63 ef
Urea 125%	82,67 ± 0,67 abc	76,50 ± 0,76 bcde	103,67 ± 0,33 abcd	94,67 ± 0,33 cde

Keterangan: Bilangan adalah rata-rata ± SED, bilangan yang diikuti huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata pada uji DMRT 5%.



Gambar 1 Pertumbuhan tanaman sorgum. (A) Aksesori Super 2 tanpa perlakuan FMA; (B) Aksesori Super 2 dengan perlakuan FMA; (C) Aksesori KS tanpa perlakuan FMA; (D) Aksesori KS dengan perlakuan FMA; (NP0) kontrol; (NP1) dosis pupuk TSP 125%; (NP2) dosis pupuk TSP dan urea 100%; (NP3) dosis pupuk TSP 75%; (NP4) dosis pupuk TSP 50%; (NP5) dosis pupuk TSP 12,5%; (NP6) dosis pupuk urea 125%; (NP7) dosis pupuk urea 75%; (NP8) dosis pupuk urea 50%; (NP9) dosis pupuk urea 12,5%.

Aplikasi FMA pada tanaman sorgum berpengaruh nyata pada panjang akar pada kedua aksesori. Aksesori Super 2 dan KS memberikan hasil yang serupa, yaitu pemupukan dengan dosis urea 12,5% dan TSP 12,5% menghasilkan akar terpanjang (Tabel 3). Hasil tersebut menunjukkan penurunan penggunaan pupuk untuk menunjang pertumbuhan panjang akar tanaman sorgum mencapai 87,5% dibandingkan kontrol positif (urea dan TSP 100%). Pada banyak penelitian telah dibuktikan bahwa manfaat utama FMA untuk tanaman berasal dari pengaruhnya pada sistem akar tanaman inang. Geo *et al.* (2018) melaporkan bahwa peningkatan panjang akar dengan aplikasi FMA disebabkan oleh peningkatan perolehan nutrisi, ketahanan akar terhadap patogen, dan ketersediaan air bagi tanaman sehingga mengarah pada peningkatan pertumbuhan akar. Peningkatan panjang akar berkorelasi dengan tingkat kolonisasi akar yang terjadi. Tingkat kolonisasi akar tertinggi pada kedua aksesori terdapat pada pemberian dosis urea 12,5% dan TSP 12,5%. Tingkat kolonisasi akar yang lebih tinggi umumnya dikaitkan dengan hifa dan akar yang lebih panjang dan ekstensif sehingga mampu mengeksplorasi volume tanah lebih besar dibandingkan dengan tanaman yang tidak diinokulasikan oleh FMA (Chen *et al.* 2017; McCormack & Iversen 2019).

Aplikasi FMA secara nyata meningkatkan biomassa tajuk tanaman sorgum pada kedua aksesori. Pada aksesori

Super 2, pemupukan dengan dosis urea 50% dan TSP 75% mengindikasikan hasil yang terbaik pada bobot basah tajuk maupun bobot kering tajuk (Tabel 4). Berdasarkan biomassa aksesori Super 2, FMA dapat menurunkan penggunaan pupuk urea mencapai 50% dan TSP mencapai 25% dibandingkan kontrol positif (urea dan TSP 100%).

Aplikasi FMA dan pemupukan dengan dosis urea 50% dan TSP 50% secara nyata meningkatkan baik bobot basah tajuk maupun bobot kering tajuk pada aksesori KS (Tabel 5). Berdasarkan hasil tersebut, FMA dapat meningkatkan biomassa tajuk dengan penurunan penggunaan pupuk urea dan TSP mencapai 50% dibandingkan kontrol positif (urea dan TSP 100%).

Tinggi atau rendahnya efektivitas FMA pada suatu tanaman dibedakan melalui biomassa yang menunjukkan kemampuan adaptasi FMA pada tanaman inang yang berperan penting dalam kinerja simbiosis keduanya (Verzeaux *et al.* 2017). FMA yang diaplikasikan pada tanaman sorgum membentuk simbiosis lebih baik dengan aksesori KS. Selain itu, pemberian pupuk urea berperan besar dalam meningkatkan biomassa tajuk tanaman. FMA meningkatkan serapan hara N yang berdampak pada meningkatnya laju fotosintesis tanaman yang mengarah pada meningkatnya bobot tanaman (Bassi *et al.* 2018). FMA berperan penting dalam perolehan N bagi tanaman baik dari sumber organik maupun anorganik, antara lain dalam bentuk

Tabel 3 Pengaruh aplikasi Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA) pada panjang akar tanaman sorgum aksesori Super 2 dan Konawe Selatan

Dosis pupuk	Panjang akar (cm)			
	Aksesori Super 2		Aksesori Konawe Selatan	
	FMA	Tanpa FMA	FMA	Tanpa FMA
Kontrol	22,67 ± 1,20 cd	11,00 ± 1,00 k	21,33 ± 1,76 abc	12,67 ± 2,84 f
TSP 12,5%	28,00 ± 1,53 a	12,33 ± 1,86 jk	24,33 ± 2,67 a	13,67 ± 0,67 ef
TSP 50%	26,00 ± 2,08 ab	13,67 ± 1,67 ij	22,33 ± 0,88 ab	16,00 ± 1,15 def
TSP 75%	23,00 ± 1,15 cd	15,67 ± 0,67 hi	21,33 ± 1,86 abc	17,00 ± 1,00 cdef
TSP 125%	19,33 ± 1,33 ef	16,33 ± 0,67 h	19,33 ± 2,73 abcd	17,67 ± 0,33 bcdef
TSP dan Urea 100%	20,67 ± 1,45 de	17,33 ± 0,88 fgh	20,33 ± 0,33 abcd	17,00 ± 0,58 cdef
Urea 12,5%	24,67 ± 0,88 bc	11,67 ± 1,20 jk	23,67 ± 0,88 a	13,33 ± 1,20 ef
Urea 50%	23,33 ± 1,33 c	13,00 ± 2,08 jk	22,33 ± 0,88 ab	15,33 ± 1,86 def
Urea 75%	22,67 ± 0,67 cd	13,67 ± 1,20 ij	21,33 ± 1,86 abc	16,33 ± 1,76 cdef
Urea 125%	19,00 ± 1,15 efg	16,67 ± 1,86 gh	19,33 ± 0,67 abcd	18,22 ± 2,19 bcde

Keterangan: Bilangan adalah rata-rata ± SED, bilangan yang diikuti huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata pada uji DMRT 5%.

Tabel 4 Pengaruh aplikasi Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA) pada biomassa tajuk tanaman sorgum aksesori Super 2

Dosis pupuk	Bobot basah tajuk		Bobot kering tajuk	
	g tanaman ⁻¹			
	FMA	Tanpa FMA	FMA	Tanpa FMA
Kontrol	7,58 ± 0,25 bcd	5,08 ± 0,29 h	1,32 ± 0,13 bcd	0,90 ± 0,13 f
TSP 12,5%	7,88 ± 0,05 bc	5,83 ± 0,30 fgh	1,45 ± 0,09 abc	0,97 ± 0,11 def
TSP 50%	8,16 ± 0,16 b	6,27 ± 0,24 efg	1,47 ± 0,06 abc	1,00 ± 0,14 def
TSP 75%	9,11 ± 0,30 a	6,86 ± 0,43 de	1,61 ± 0,14 ab	1,20 ± 0,08 cdef
TSP 125%	7,62 ± 0,24 bcd	7,08 ± 0,54 cde	1,34 ± 0,10 bcd	1,23 ± 0,11 bcdef
TSP dan Urea 100%	7,95 ± 0,22 bc	7,15 ± 0,17 cde	1,47 ± 0,15 abc	1,31 ± 0,07 bcd
Urea 12,5%	7,60 ± 0,26 bcd	5,47 ± 0,28 gh	1,33 ± 0,14 bcd	0,93 ± 0,12 ef
Urea 50%	9,23 ± 0,20 a	6,26 ± 0,13 efg	1,73 ± 0,03 a	0,98 ± 0,06 def
Urea 75%	8,28 ± 0,29 b	6,50 ± 0,20 ef	1,52 ± 0,11 abc	1,17 ± 0,03 cdef
Urea 125%	7,78 ± 0,22 bc	7,12 ± 0,28 cde	1,45 ± 0,23 abc	1,28 ± 0,10 bcde

Keterangan: Bilangan adalah rata-rata ± SED, bilangan yang diikuti huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata pada uji DMRT 5%.

Tabel 5 Pengaruh aplikasi Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA) pada biomassa tajuk tanaman sorgum aksesori Konawe Selatan

Dosis pupuk	Bobot basah tajuk		Bobot kering tajuk	
	g tanaman ⁻¹			
	FMA	Tanpa FMA	FMA	Tanpa FMA
Kontrol	8,08 ± 0,26 def	3,89 ± 0,10 i	1,41 ± 0,14 cde	0,62 ± 0,17 i
TSP 12,5%	8,75 ± 0,19 cde	5,21 ± 0,50 h	1,56 ± 0,02 cd	1,01 ± 0,05 gh
TSP 50%	10,48 ± 0,28 b	7,06 ± 1,18 fg	2,33 ± 0,10 a	1,20 ± 0,08 efg
TSP 75%	10,48 ± 0,13 b	7,20 ± 0,17 fg	1,99 ± 0,02 b	1,34 ± 0,05 de
TSP 125%	8,24 ± 0,22 def	7,49 ± 0,57 def	1,50 ± 0,06 cd	1,40 ± 0,03 cde
TSP dan Urea 100%	8,86 ± 0,78 cd	7,35 ± 0,69 ef	1,66 ± 0,08 c	1,37 ± 0,02 de
Urea 12,5%	8,53 ± 0,24 def	4,73 ± 0,24 hi	1,53 ± 0,06 cd	0,88 ± 0,04 h
Urea 50%	12,84 ± 0,20 a	5,93 ± 0,18 gh	2,43 ± 0,05 a	1,08 ± 0,12 fgh
Urea 75%	10,10 ± 0,14 bc	7,07 ± 0,11 fg	1,66 ± 0,04 c	1,32 ± 0,06 def
Urea 125%	8,82 ± 0,18 cd	7,85 ± 0,38 def	1,66 ± 0,04 c	1,40 ± 0,05 cde

Keterangan: Bilangan adalah rata-rata ± SED, bilangan yang diikuti huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata pada uji DMRT 5%.

NH₄⁺ dan NO₃⁻ (Ingraffia *et al.* 2020). Penyerapan, translokasi, dan transfer hara N oleh FMA melibatkan ekspresi gen metabolik yang terdapat di hifa eksternal, hifa internal, dan tanaman inang yang mencakup sintesis dan akumulasi arginina di hifa eksternal, transfer arginina ke hifa internal untuk dipecah dan melepaskan amonium, dan asimilasi amonium oleh tanaman inang (Tian *et al.* 2010). Whiteside *et al.* (2012) melaporkan bahwa asam amino seperti arginina ditransfer ke tanaman saat *Sorghum bicolor* terkolonisasi oleh FMA, yang menunjukkan terjadinya transporter pada FMA.

Aplikasi FMA berpengaruh nyata pada biomassa akar tanaman aksesori Super 2 dan KS. Pemupukan dengan dosis urea 12,5% dan TSP 12,5% serta aplikasi FMA menghasilkan bobot basah dan bobot kering akar tertinggi dibandingkan perlakuan lainnya (Tabel 6 dan 7). FMA dapat meningkatkan biomassa akar pada kedua aksesori dengan menurunkan penggunaan pupuk urea dan TSP mencapai 87,5% dibandingkan kontrol positif (urea dan TSP 100%).

Penurunan kebutuhan pupuk untuk peningkatan biomassa akar berhubungan dengan peningkatan efisiensi penggunaan hara P akibat aplikasi FMA. Pada umumnya, efisiensi penggunaan P di bidang pertanian hanya sekitar 15–20%, tetapi keberadaan FMA dapat meningkatkan efisiensi penggunaan P untuk tanaman yang berdampak pada meningkatnya panjang akar dan kepadatan akar dan mengarah pada peningkatan biomassa akar dan kemampuan penetrasi yang lebih besar (Malhotra *et al.* 2018). FMA membantu meningkatkan ketersediaan hara P bagi tanaman dengan membantu meningkatkan kelarutan hara P menggunakan asam fosfatase yang dihasilkan. Asam fosfatase berperan penting dalam mineralisasi P dari sumber organik (Wang *et al.* 2020). Peningkatan biomassa akar juga disebabkan oleh kolonisasi akar oleh FMA sehingga meningkatkan diameter akar tanaman inang karena hifa yang terbentuk membuat volume korteks akar bertambah. Dampak akhirnya ialah meningkatkan bobot basah dan bobot kering akar (McCormack & Iversen 2019).

Kolonisasi Akar Tanaman

FMA yang diinokulasikan pada tanaman sorgum berhasil mengkolonisasi akar di kedua aksesori tanaman sorgum. Namun, respons kedua aksesori tersebut cukup berbeda walaupun persentase tertinggi didapatkan pada dosis urea dan TSP yang sama, yaitu dosis urea 12,5% dan dosis TSP 12,5% (Tabel 8). Persentase kolonisasi akar tanaman sorgum aksesori KS lebih tinggi dibandingkan aksesori Super 2. Hal tersebut karena setiap spesies FMA memiliki preferensi yang berbeda pada tanaman dengan genotipe yang berbeda berdasarkan perbedaan tingkat kolonisasi (Hindumathi & Reddy 2011).

Akar yang terkolonisasi oleh FMA menunjukkan bahwa FMA yang diinokulasikan berhasil membentuk simbiosis dengan tanaman inang (Gambar 2). Simbiosis FMA dengan tanaman inang dapat dicapai melalui komunikasi kimia antara FMA dengan akar tanaman inang. FMA melepaskan faktor Myc yang dapat dikenal oleh tanaman dan mengaktifkan sinyal untuk simbiosis. Kemudian, strigolaktin dilepaskan oleh akar inang dan membuat spora FMA berkecambah dan berlanjut pada tumbuhnya hifa FMA yang mengarah ke arah akar inang. Setelah hifa menyentuh permukaan akar, hipopodia akan terbentuk dan sel-sel epidermis akar akan menjalani serangkaian peristiwa untuk membentuk *prepenetration apparatus* (PPA) yang memandu hifa menembus sel epidermis akar. FMA kemudian tumbuh di antara sel dan pada akhirnya hifa akan tumbuh menjadi sel kortikal akar dan membentuk struktur bercabang yang disebut dengan arbuskula (Oldroyd 2013).

Berdasarkan uji konsentrasi gradien N dan P, penurunan kolonisasi akar terjadi seiring dengan dengan meningkatnya konsentrasi N dan P yang diaplikasikan pada tanaman sorgum. Konsentrasi P yang tinggi di media tanam dapat menurunkan kolonisasi akar oleh FMA (Gosling *et al.* 2013). Konsentrasi P berpotensi mengubah komposisi eksudat akar serta inhibitor dan aktivator untuk perkembangan FMA. Strigolaktin cenderung berkurang pada kondisi konsentrasi P yang tinggi dan tanaman tidak

Tabel 6 Pengaruh aplikasi Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA) pada biomassa akar tanaman sorgum aksesi Super 2

Dosis pupuk	Bobot basah akar		Bobot kering akar	
	g tanaman ⁻¹			
	FMA	Tanpa FMA	FMA	Tanpa FMA
Kontrol	3,10 ± 0,12 b	1,31 ± 0,20 f	0,67 ± 0,06 cde	0,40 ± 0,07 g
TSP 12,5%	4,33 ± 0,29 a	1,80 ± 0,09 ef	1,04 ± 0,05 a	0,47 ± 0,05 fg
TSP 50%	4,24 ± 0,33 a	2,11 ± 0,32 de	0,88 ± 0,05 ab	0,52 ± 0,05 efg
TSP 75%	3,13 ± 0,34 b	2,26 ± 0,02 cde	0,76 ± 0,06 bcd	0,58 ± 0,06 defg
TSP 125%	2,88 ± 0,35 bc	2,59 ± 0,32 bcd	0,65 ± 0,07 cdef	0,60 ± 0,07 def
TSP dan Urea 100%	3,06 ± 0,11 b	2,85 ± 0,11 bc	0,65 ± 0,06 cdef	0,63 ± 0,06 cdef
Urea 12,5%	4,03 ± 0,09 a	1,66 ± 0,14 ef	0,81 ± 0,05 bc	0,40 ± 0,05 g
Urea 50%	3,88 ± 0,13 a	1,89 ± 0,18 ef	0,77 ± 0,04 bcd	0,49 ± 0,04 efg
Urea 75%	3,12 ± 0,07 b	2,11 ± 0,06 de	0,75 ± 0,07 bcd	0,53 ± 0,07 efg
Urea 125%	2,85 ± 0,10 bc	2,71 ± 0,22 bcd	0,63 ± 0,06 cdef	0,61 ± 0,06 def

Keterangan: Bilangan adalah rata-rata ± SED, bilangan yang diikuti huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata pada uji DMRT 5%.

Tabel 7 Pengaruh aplikasi Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA) pada biomassa akar tanaman sorgum aksesi Konawe Selatan

Dosis pupuk	Bobot basah akar		Bobot kering akar	
	g tanaman ⁻¹			
	FMA	Tanpa FMA	FMA	Tanpa FMA
Kontrol	2,84 ± 0,06 cd	0,95 ± 0,13 j	0,71 ± 0,07 bcde	0,36 ± 0,07 g
TSP 12,5%	4,90 ± 0,05 a	1,70 ± 0,20 hi	1,05 ± 0,05 a	0,45 ± 0,05 fg
TSP 50%	3,57 ± 0,06 ab	1,72 ± 0,10 hi	0,89 ± 0,03 ab	0,50 ± 0,03 efg
TSP 75%	3,25 ± 0,15 bc	1,85 ± 0,10 fghi	0,78 ± 0,03 bcd	0,54 ± 0,03 defg
TSP 125%	2,52 ± 0,02 de	2,19 ± 0,12 efg	0,63 ± 0,09 cdef	0,58 ± 0,09 cdefg
TSP dan Urea 100%	2,58 ± 0,25 de	2,14 ± 0,17 efgh	0,69 ± 0,07 bcdef	0,57 ± 0,07 cdefg
Urea 12,5%	3,87 ± 0,04 a	1,52 ± 0,10 i	0,93 ± 0,05 ab	0,45 ± 0,05 fg
Urea 50%	3,27 ± 0,15 bc	1,71 ± 0,24 hi	0,80 ± 0,07 bc	0,50 ± 0,07 efg
Urea 75%	2,61 ± 0,23 de	1,81 ± 0,17 ghi	0,70 ± 0,06 bcdef	0,50 ± 0,06 efg
Urea 125%	2,38 ± 0,01 de	2,29 ± 0,20 ef	0,61 ± 0,08 cdefg	0,60 ± 0,08 cdefg

Keterangan: Bilangan adalah rata-rata ± SED, bilangan yang diikuti huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata pada uji DMRT 5%.

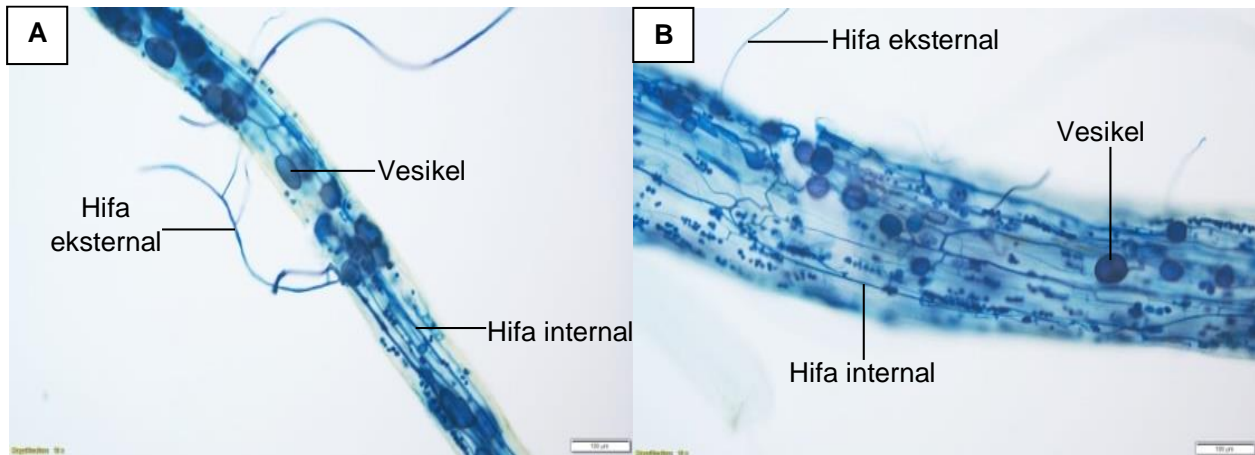
Tabel 8 Pengaruh aplikasi Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA) pada kolonisasi akar tanaman sorgum aksesi Super 2 dan Konawe Selatan

Dosis pupuk	Kolonisasi akar (%)			
	Aksesi Super 2		Aksesi Konawe Selatan	
	FMA	Tanpa FMA	FMA	Tanpa FMA
Kontrol	53,67 ± 3,09 bc	0,00 ± 0,00 d	54,61 ± 12,27 abc	0,00 ± 0,00 d
TSP 12,5%	66,44 ± 7,94 a	0,00 ± 0,00 d	67,11 ± 7,37 a	0,00 ± 0,00 d
TSP 50%	60,00 ± 3,90 ab	0,00 ± 0,00 d	66,06 ± 7,63 ab	0,00 ± 0,00 d
TSP 75%	55,89 ± 1,90 abc	0,00 ± 0,00 d	57,44 ± 3,40 abc	0,00 ± 0,00 d
TSP 125%	52,28 ± 4,48 bc	0,00 ± 0,00 d	49,94 ± 2,26 bc	0,00 ± 0,00 d
TSP dan Urea 100%	52,67 ± 5,38 bc	0,00 ± 0,00 d	51,53 ± 6,22 abc	0,00 ± 0,00 d
Urea 12,5%	59,06 ± 5,92 abc	0,00 ± 0,00 d	66,94 ± 5,29 a	0,00 ± 0,00 d
Urea 50%	57,72 ± 2,02 abc	0,00 ± 0,00 d	60,72 ± 3,43 abc	0,00 ± 0,00 d
Urea 75%	55,33 ± 6,44 bc	0,00 ± 0,00 d	53,62 ± 11,05 abc	0,00 ± 0,00 d
Urea 125%	48,78 ± 3,98 c	0,00 ± 0,00 d	46,67 ± 9,18 c	0,00 ± 0,00 d

Keterangan: Bilangan adalah rata-rata ± SED, bilangan yang diikuti huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata pada uji DMRT 5%.

menghasilkan sinyal untuk pembentukan simbiosis dengan FMA yang berdampak pada terhentinya pembentukan arbuskula dan berkurangnya kolonisasi pada akar tanaman inang (Balzergue *et al.* 2013; El-Sherbeny *et al.* 2021). Begitu pula yang terjadi pada hara N. FMA memerlukan unsur N yang cukup untuk dapat menjalankan metabolismenya dengan baik, tetapi peningkatan konsentrasi N pada media tanam secara negatif dapat memengaruhi kapasitas kerja

FMA. Hal tersebut disebabkan oleh ketersediaan N yang tinggi meningkatkan asimilasi NO₃ yang berdampak pada berkurangnya kandungan gula di dalam akar karena asimilasi NO₃ membutuhkan energi metabolik dan karbon yang keduanya disuplai oleh gula dalam organ heterotrofik seperti akar. Penurunan kandungan gula di akar menyebabkan terhambatnya proses infeksi akar oleh FMA (Diaz *et al.* 2010).



Gambar 2 Kolonisasi akar tanaman sorgum (A) aksesori Super 2 dan (B) aksesori KS (perbesaran 100×).

KESIMPULAN

Aplikasi FMA dan hara N dan P melalui pemupukan dengan dosis optimum, yaitu urea 50% dan TSP 75% untuk aksesori Super 2 serta dosis urea 50% dan TSP 50% untuk aksesori KS dapat menunjang pertumbuhan kedua aksesori tanaman sorgum berdasarkan peningkatan tinggi tanaman dan biomassa tajuk tanaman sorgum. Peningkatan pertumbuhan tanaman sorgum pada kedua aksesori tidak berkorelasi dengan kolonisasi akar; persentase kolonisasi akar tertinggi terdapat pada aplikasi FMA serta pupuk dengan dosis urea 12,5% dan TSP 12,5%. Namun, kolonisasi akar memengaruhi pertambahan panjang dan biomassa akar pada kedua aksesori tanaman sorgum. FMA dapat meningkatkan efisiensi dan meminimumkan pemakaian pupuk urea dan TSP guna menunjang pertumbuhan tanaman sorgum pada kedua aksesori. Efisiensinya mencapai 50% berdasarkan tinggi tanaman dan biomassa tajuk serta mencapai 87,5% berdasarkan panjang dan biomassa akar dibandingkan dengan kontrol positif (urea dan TSP 100%).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada SATREPS JST-JICA Project 2016–2022 yang telah mendanai penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- A'isyah S, Napitupulu TP, Sudiana IM. 2019. Effect of zeolite particle size and levels of phosphate absorption and growth of *Sorghum bicolor* (L.) Moench. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 308(012044): 1–6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/308/1/012044>
- Abdelhameid NM. 2020. Effect of Mycorrhizal Inoculation and Potassium Fertilization on Grain Yield and Nutrient Uptake of Sweet Sorghum

Cultivated under Water Stress in Calcareous Soil. *Egyptian Journal of Soil Science*. 60(1): 17–29.

- Ananda GKS, Myrans H, Norton SL, Gleadow R, Furtado A, Henry RJ. 2020. Wild Sorghum as a Promising Resource for Crop Improvement. *Frontiers in Plant Science*. 11(1108): 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01108>
- Arteaga S, Yabor L, Díez MJ, Prohens J, Boscaiu M, Vicente O. 2020. The Use of Proline in Screening for Tolerance to Drought and Salinity in Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Genotypes. *Agronomy*. 20(817): 2–16. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060817>
- Astuti D, Sulistyowati Y, Nugroho S. 2019. Uji Radiosensitivitas Sinar Gamma untuk Menginduksi Keragaman Genetik Sorgum Berkadar Lignin Tinggi. *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*. 15(1): 1–6.
- Bai X, Zhang T, Tian S. 2020. Evaluating Fertilizer Use Efficiency and Spatial Correlation of Its Determinants in China: A Geographically Weighted Regression Approach. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 17(8830): 1–23. <https://doi.org/10.3390/ijerph17238830>
- Balergue C, Chabaud M, Barker DG, Bécard G, Rochange SF. 2013. High phosphate reduces host ability to develop arbuscular mycorrhizal symbiosis without affection root calcium spiking responses to the fungus. *Frontiers in Plant Science*. 4(426): 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00426>
- Bassi D, Menossi M, Mattiello L. 2018. Nitrogen supply influences photosynthesis establishment along the sugarcane leaf. *Scientific Reports*. 8(2327): 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20653-1>
- Boonlue S, Surapat W, Pukahuta C, Suwanarit P, Suwanarit A, Morinaga T. 2012. Diversity and efficiency of arbuscular mycorrhizal fungi in soils from organic chili (*Capsicum frutescens*) farms.

- Mycoscience*. 53: 10–16. <https://doi.org/10.1007/s10267-011-0131-6>
- Brundrett M, Bougher N, Dell B, Grove T, Malajczuk N. 1996. *Working with Mycorrhizas in Forestry and Agriculture*. Canberra: ACIAR Monograph 32.
- Chen M, Yang G, Sheng Y, Li P, Qiu H, Zhou X, Huang L, Chao Z. 2017. *Glomus mosseae* Inoculation Improves the Root System Architecture, Photosynthetic Efficiency and Flavonoids Accumulation of Liquorice under Nutrient Stress. *Frontiers in Plant Science*. 8(931): 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.05.005>
- Devnarain N, Crampton BG, Chikwamba R, Becker JW, O’Kennedy MM. 2016. Physiological responses of selected African sorghum landraces to progressive water stress and re-watering. *South African Journal of Botany*. 103: 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2015.09.008>
- Diagne N, Ngom M, Djighaly PI, Fall D, Hoher V, Svistoonoff S. 2020. Roles of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Plant Growth and Performance: Importance in Biotic and Abiotic Stressed Regulation. *Diversity*. 12(370): 1–25. <https://doi.org/10.3390/d12100370>
- Diaz G, Carrillo C, Honrubia M. 2010. Mycorrhization, growth and nutrition of *Pinus halepensis* seedlings fertilized with different doses and sources of nitrogen. *Annals of Forest Science*. 67(405): 1–9. <https://doi.org/10.1051/forest/2009125>
- El-Sherbeny TMS, Mousa AM, El-Sayed E-SR. 2021. Use of mycorrhizal fungi and phosphorus fertilization to improve the yield of onion (*Allium cepa* L.) plant. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 29: 331–338. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.08.094>
- Geo JA, Nair AS, Vijayan AK. 2018. Association of *Glomus Intraradices* in *Sorghum Bicolor*. *International Journal of Agricultural Science and Food Technology*. 4(1): 3–6. <https://doi.org/10.17352/2455-815X.000029>
- Giovannetti M, Mosse B. 1980. An Evaluation of Techniques for Measuring Vesicular Arbuscular Mycorrhizal Infection in Roots. *New Phytologist*. 84: 489–500. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1980.tb04556.x>
- Gosling P, Mead A, Proctor M, Hammond JP, Bending GD. 2013. Contrasting arbuscular mycorrhizal communities colonizing different host plants show a similar response to a soil phosphorus concentration gradient. *New Phytologist*. 198: 546–556. <https://doi.org/10.1111/nph.12169>
- Heijden MGA, Martin FM, Selosse M-A, Sanders IR. 2015. Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. *New Phytologist*. 205: 1406–1423. <https://doi.org/10.1111/nph.13288>
- Hindumathi A, Reddy BN. 2011. Dependency of Sorghum on Arbuscular Mycorrhizal Colonization for Growth and Development. *Journal of Mycology and Plant Pathology*. 41(4): 537–542.
- Ingraffia R, Amato G, Sosa-Hernández MA, Frenda AS, Rillig MC, Giambalvo D. 2020. Nitrogen Type and Availability Drive Mycorrhizal Effects on Wheat Performance, Nitrogen Uptake and Recovery, and Production Sustainability. *Frontiers in Plant Science*. 11(760): 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00760>
- Koske RE, Gemma JN. 1989. A modified procedure for staining roots to detect VA mycorrhizas. *Mycology Research*. 92(4): 486–505. [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(89\)80195-9](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(89)80195-9)
- Maiti RK. 1996. *Sorghum Science*. Lebanon (FR): Science Publishers.
- Malhotra H, Vandana, Sharma S, Pandey R. 2018. *Phosphorus Nutrition: Plant Growth in Response to Deficiency and Excess*. Hasanuzzaman M *et al*, editor. Singapura (SG): Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8_7
- McCormack ML, Iversen CM. 2019. Physical and Functional Constraints on Viable Belowground Acquisition Strategies. *Frontiers in Plant Science*. 10(1215): 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01215>
- Nakmee PS, Techapinyawat S, Ngamprasit S. 2016. Comparative potentials of native arbuscular mycorrhizal fungi to improve nutrient uptake and biomass of *Sorghum bicolor* Linn. *Agriculture and Natural Resources*. 50: 173–178. <https://doi.org/10.1016/j.anres.2016.06.004>
- Oldroyd GED. 2013. Speak, friend, and enter: signalling systems that promote beneficial symbiotic associations in plants. *Nature Reviews Microbiology*. 11: 252–263. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2990>
- Purwanto A, Sušnik J, Suryadi FX, de Fraiture C. 2021. Quantitative simulation of the water-energy-food (WEF) security nexus in a local planning context in indonesia. *Sustainable Production and Consumption*. 25: 198–216. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.08.009>
- Ramadhani I, Suliasih, Widawati S, Sudiana IM, Kobayashi M. 2019. The effect of combination of arbuscular mycorrhiza and rhizobacteria and doses of NPK fertilizer on the growth of *Sorghum bicolor* (L.) Moench. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 308(012045): 1–11. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/308/1/012045>
- Rani B, Madan S, Sharma KD, Pooja, Berwal MK, Kumar A. 2017. Effect of Mycorrhizal Colonization on Nitrogen and Phosphorus Metabolism in Wheat (*Triticum aestivum* L.) under Water Deficit Stress.

- International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 6(10): 916–929. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.610.110>
- Subagio H, Aqil M. 2014. Perakitan dan Pengembangan Varietas Unggul Sorgum untuk Pangan, Pakan, dan Bioenergi. *Iptek Tanaman Pangan*. 9(1): 39–50.
- Suminar R, Suwanto, Purnamawati H. 2017. Penentuan Dosis Optimum Pemupukan N, P, dan K pada Sorgum. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*. 22(1): 6–12. <https://doi.org/10.18343/jipi.22.1.6>
- Suwarti, Efendi R, Massinai R, Pabendon MB. 2018. Evaluation of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. [Moench]) on several population density for bioethanol production. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 141(012032): 1–11. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/141/1/012032>
- Tian C, Kasiborski B, Koul R, Lammers PJ, Bücking H, Shahchar-Hill Y. 2010. Regulation of Nitrogen Transfer Pathway in the Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis: Gene Characterization and the Coordination of Expression with Nitrogen Flux. *Plant Physiology*. 153: 1175–1187. <https://doi.org/10.1104/pp.110.156430>
- Verzeaux J, Hirel B, Dubois F, Lea PJ, Tétu T. 2017. Agricultural practices to improve nitrogen use efficiency through the use of arbuscular mycorrhizae: Basic and agronomic aspects. *Plant Science*. 264: 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.08.004>
- Wang F, Sun Y, Shi Z. 2019. Arbuscular Mycorrhiza Enhances Biomass Production and Salt Tolerance of Sweet Sorghum. *Microorganisms*. 7(289): 1–14. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7090289>
- Wang X, Hoffland E, Feng G, Kuyper TW. 2020. Arbuscular mycorrhizal symbiosis increases phosphorus uptake and productivity of mixtures of maize varieties compared to monocultures. *Journal of Applied Ecology*. 1–9. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13739>
- Whiteside MD, Garcia MO, Treseder KK. 2012. Amino Acid Uptake in Arbuscular Mycorrhizal Plants. *PLoS ONE*. 7(10): 1–4. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047643>
- Zaman I, Ali M, Shahzad K, Tahir MS, Matloob A, Ahmad W, Alamri S, Khurshid MR, Qureshi MM, Wasaya A, Baig KS, Siddiqui MH, Fahad S, Datta R. 2021. Effect of Plant Spacings on Growth, Physiology, Yield and Fiber Quality Attributes of Cotton Genotypes under Nitrogen Fertilization. *Agronomy*. 11(2589): 1–15. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122589>
- Zubair A. 2016. *SORGUM: Tanaman Multi Manfaat*. Bandung (ID): Unpad Press.