**Pemupukan Silikon dalam Meningkatkan Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Sorghum**

***Silicone Fertilization in Increasing The Growth and Yield of Sorghum Plant***

***ABSTRACT***

***Continuous use of Silicon (Si) without fertilizing inputs can cause Si available in the soil to decrease. Low Si content can be a limiting factor for a plant to decrease yields. Si is a beneficial element that is needed by sorghum for its growth. Sorghum is a good alternative crop, especially in dry areas, so sorghum often experiences water deficit stress. Si absorption is very beneficial for sorghum plants because of its role in increasing plant resistance to water stress. In addition, Si also has an important role, namely being resistant to attacks by plant-disturbing organisms (OPT), and increasing plant growth and crop yields. However, there are still many people who do not realize the importance of Si in sorghum. So that a need for information related to the role of Si and fertilization management in sorghum.***

***Keywords: growth; stress; silicon; sorghum; yield***

**INTISARI**

**Penggunaan Silikon (Si) secara terum-menerus tanpa adanya input pemupukan dapat menyebabkan Si tersedia di dalam tanah semakin menurun. Kandungan Si yang rendah dapat menjadi faktor pembatas suatu tanaman terhadap penurunan hasil. Si merupakan *beneficial element* yang sangat dibutuhkan oleh sorghum terhadap pertumbuhannya. Sorghum merupakan tanaman alternatif yang baik terutama di daerah kering, sehingga sorghum sering mengalami cekaman defisit air. Penyerapan Si sangat bermanfaat bagi tanaman sorghum karena perannya yang dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman air. Selain itu, Si juga memiliki peranan penting yaitu tahan terhadap serangan organisme pengganggu tanaman (OPT), meningkatkan pertumbuhan tanaman hingga hasil tanaman. Akan tetapi, masih banyak masyarakat yang belum menyadari pentingnya Si pada sorghum. Sehingga perlunya informasi terkait peran Si dan manajemen pemupukan pada sorghum.**

Kata kunci: cekaman, hasil; pertumbuhan; pupuk; silikon; sorghum

**PENDAHULUAN**

Daerah arid dan semi arid merupakan faktor pembatas bagi pertumbuhan tanaman, meskipun adanya irigasi tidak mengurangi kehilangan air untuk tanaman karena adanya evapotranspirasi dan pencucian (Bocharnikova dan Matichenkov, 2008). Sorghum (*Sorghum bicolor* L) merupakan salah satu tanaman yang tumbuh di daerah kering di Asia dan Afrika karena dapat bertahan dibawah kondisi kekeringan (Ahmed *et al.,* 2011). Sorghum sebagao tanaman serealia pilihan yang lebih memadai, dimana kondisi lingkungan yang menjadi faktor pembatas bagi beberapa tanaman, namun sorghum dapat tumbuh (Ahmed *et al.,* 2011; Jahanzad *et al.,* 2013; Rizal *et al.,* 2014; Hadebe *et al.,* 2017).

Silikon (Si) merupakan unsur pupuk yang penting secara agronomik yang dapat meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman abiotik (Liang *et al.,* 2005). Penggunaan Si dapat meningkatkan kemampuan menyerap air dengan baik sehingga berguna meningkatkan toleransi sorghum terhadap kekeringan (Kalteh *et al.,* 2014; Ghanem *et al.,* 2019). Si juga meningkatkan berat segar dan kering dengan meningkatkan morfologi daun dan bunga seperti pertambahan luas daun, ketebalan daun, diameter bunga, permukaan kelopak dan ketebalan kelopak (Alikhani *et al.,* 2020). Selain itu, Si juga dilaporkan dapat mengendalikan dan mengurangi serangan hama dan penyakit. Secara umum, pengaruh silikon terhadap ketahanan terhadap hama dan penyakit karena adanya kandungan Si apda dinding sel yang menjadi penghalang selutinya serangan patogen dan serangan hama atau perubahan biokiia yang terkait pertahanan tanaman (Reynolds *et al., 2016;* Sakr 2016; Sakr 2017).

Berdasarkan hal tersebut, penggunaan Si pada sorghum perlu dilakukan. Akan tetapi, masih banyak yang belum mengetahui pentingnya Si pada tanaman terutama pada sorghum. Oleh karena itu, mengingat pentingnya Si pada tanaman dan sangat dibutuhkan dalam meningkatkan produktivitas tanaman, tulisan ini akan membahas mengenai pentingnya Si pada sorghum, sumber Si yang dapat dijadikan sebagai pupuk, dan praktek manajemen pupuk Si yang tepat untuk sorghum.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Silikon pada Tanaman**

Tanaman menyerap Si dalam bentuk asam monosilika (H4SiO4) melalui difusi dan aliran masa. Konsentrasi Si di xylem pada beberapa tanaman biasanya berkali-kali lipat lebih tinggi daripada larutan tanah, sehingga mennjukkan penyerapan Si didorong secara metabolic (Jeelani *et al.,* 2020). Kandungan Si sangat bervariasi pada tanaman, mulai dari 0.1-10% dari berat kering (Liang *et al.,* 2007). Kandungan Si pada tumbuhan adalah setara dengan atau lebih dari unsur hara utama N,P, dan K yang diberikan melalui pupuk (Meena *et al.,* 2014). Meskipun bukan termasuk unsur hara essensial, Si memiliki peran penting dalam metabolism atau aktivitas fisiologis, pertumbuhan tanaman, dan cekaman biotik dan abiotic (Liang *et al.,* 2015).

**Sumber Silikon**

Sorghum mengakumulasi Si pada jaringan tanaman berkisar antara 0.8-2 dag kg-1 (Resende *et al.,* 2013). Si memberikan pengaruh positive terhadap sorghum melalui fiksasi karbon, meningkatkan sistem antioksidan, dan meningkatkan ketahanan tanaman terhadap *C. sublineolum*.

Biochar digunakan untuk meningkatkan kualitas tanah, penyerapan karbon, menurunkan toksisitas logam berat pada tanaman, dan juga sebagai nutrisi tanaman (Bian *et al.,* 2014; Al-Wabel *et al.,* 2015; Liu *et al.,* 2017). Studi melaporkan bahwa biochar juga dapat meningkatkan Si tersedia bagi tanaman di dalam tanah (Abbas *et al.,* 2017). Biochar dibuat dari sisa-sisa pertanian seperti tebu, sekam, gandum dan sekam diduga memiliki kandungan Si tersedia dalam jumlah besar (Abbas *et al.,* 2017; Wang *et al.,* 2018). Tanaman menyerap silika dalam jumalh yang berbeda, tergantung pada jenis tanaman. Telah dilakukan penelitian bahwa daun dan batang jagung, sorghum serta daun tebu dan bambu memiliki silika paling tinggi dibandingkan tanaman lainnya (Meena et al., 2014).

Pupuk silikon berasal dari berbagai sumber organik dan anorganik, seperti dari tuf vulkanik, produk industri, serbuk dan bahan lainnya. (Tabel 1).

Tabel 1. Bahan yang mengandung silikon dari berbagai sumber organik dan anorganik (Kovacs *et al.,* 2022)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Produk Industri | *Rock powders* | Bahan lainnya |
| terak baja karbon (*carbon steel slag*) | Volcanic tuffs | Calcium silicate |
| baja besi (*iron steel*) | terak wollastonie | Magnesium silicate |
| terak baja tahan karat (*stainless* steel slag) | olivine | potassium silicate |
| water cooling slags | diatomaceous earth | fused magnesium phosphate |
| ferronickel slags | natural zeolites | porous hydrate calcium silicate |
| blast furnace slags | pyroxene | silica gel |
| Manganese slags |  | fused potassium magnesium silicate |
| Geothermal slags |  | soluble silicate fertilizer |
| Geothermal sludge |  |  |
| converter slags |  |  |
| Phosphorous slags |  |  |

Kandungan Si pada setiap sumber Si berbeda-beda, seperti Asam Salisilat 29% Si, Kalsium Silikat Slag 21% Si, Kalsium silikat 24% Si, Potassium silikat 18%, sodium silikat 23%, dan pasir kuarsa memiliki kandungan yang tinggi 46% (Jinger *et al.,* 2020).

*Smart fertilizer* saat ini sudah mulai dikembangkan dan dilakukan penelitian. Secara umum, smart fertilizers merupakan pupuk yang diaplikasikan ke tanah yang dapat mengelola waktu dan lama pelepasan hara, penyerapan aktif oleh akar tanaman (Calaby-floody *et al.,* 2018). Raimondi *et al.,* (2021) mendefinisikan *smart fertilizer* sebagai satu atau lebih nanomaterial, multicomponent dan bioformulasi yang mengandung satu atau lebih nutrisi yang dapat beradaptasi dalam waktu pelepasan unsur hara ke tanaman melalui proses fisik, kimia dan biologi, sehingga meningkatkan pertumbuhan dan perkembangan tanaman dan mengurangi dampak lingkungan bila dibandingkan dengan pupuk konvensional.

Nano fertilizer merupakan salah satu produk dari smart fertilizer yang berpotensi untuk meningkatkan hasil dan meningkatkan ketahanan tanaman terhadap penyakit (de Moraes *et al.,* 2022). Nanoteknologi merupakan inovasi baru untuk meningkatkan prduksi pangan global yang telah menjadi topik penelitian untuk setiap sector yang terlibat dalam produksi pertanian dan penerapannya telah membuka bidang baru dalam ilmu bioteknologi dan pertanian (Scrinis dan Lyons 2007). Nano Si telah dilaporkan dapat meningkatkan pertumbuhan dan hasil tanaman pada lingkungan biotik yang berbeda dan kondisi cekaman abiotic dan bersifat berkelanjutan (Parveen *et al.,* 2022). Beberapa pupuk Nano Si telah banyak dilakukan penelitian tehadap tanaman dan memberikan respon yang positif terhadap pertumbuhan tanaman (Tabel 2).

Tabel 2. Macam-macam pupuk Nano Si dan metode aplikasi

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Dosis** | **Aplikasi** | **Referensi** |
| 60 mg L-1 | Daun | Yasen et al., 2017 |
| 600 mg L-1,  80 mg kg-1 | Daun, akar | Ayman et al., 2018 |
| 900 mg L-1 | Daun | El-Saadony et al., 2021 |
| 15 kg ha-1 | Tanah | Suriyaprabha et al., 2012 |

Nano fertilizer merupakan pupuk yang berskala nano berkisar 1 hingga 100 nm, nanoclay dan nanopartikel mikronutrien berukuran 200 nm-500 nm (Sarkar *et al.,* 2014). Nutrisi skala nano memberi lebih banyak keuntungan dibandingkan dengan pupuk konvensional. Pupuk nano memiliki rasio luas permukaan yang tinggi, sehingga penyerapan nutrisi lebih cepat dan penggunaan nutrisi yang lebih efisien (Chhipa *et al.,* 2017; Kalia *et al.,* 2019).

**Peran Si pada Tanaman Sorghum**

Sorghum merupakan tanaman yang termasuk family *Poceae*, yang mana mengakumulasi Si dalam jumlah yang besar (Mitani dan Ma 2005). Karena mengakumulasi Si dalam jjumlah yang banyak, sehingga sorghum dapat meningkatkan ketahanan terhadap cekaman biotik dan abiotic (Etesami dan Jeong 2018). Peningkatan serapan nutrisi akibat adanya Si pada tanaman karena peran Si dalam morfologi akar (Etesami dan Jeong 2018). Akar merupakan organ penting dalam penyerapan air dan nutrisi serta dalam adaptasi tanaman terhadap kondisi stress di tanah (Gao *et al.,* 2005). Perubahan morfologi akar seperti meningkatkan luas permukaan serap akar, menambah eksudat akar, seperti menambah bobot atau panjang akar, menambah penyerapan nutrisi Si dan meningkatkan kondisi nutrisi tanaman (Etesami, 2018).

Pemberian nanosilika meningkatkan berat segat dan berat kering pada sorghum dibawah cekaman salinitas. Nanosilika dapat meningkatkan 75% berat kering dibandingkan tanpa penggunaan nanosilika pada tanaman sorghum. Selain itu, penggunaan nanosilika dapat menurunkan jumlah kandungan hydrogen peroksida sebesar 21% dan 30%, jumlah peroksidasi lipid sekitar 13% dan 23% pada tanaman sorghum (Zarooshan *et al.,* 2021).

Pemupukan Si melalui daun pada tanaman sorghum dapat menurunkan efek yang ditimbulkan akibat defisiensi Zn pada sorghum. Kombinasi pupuk Si dan Zn dikatakan layak secara agronomi, karena Si dapat meningkatkan akumulasi Zn, fotosintesis dan meningkatkan bahan akar kering (de Farias Guedes *et al.,* 2022). Hal tersebut karena adanya interaksi sinergis antara Si dan Zn yang berkontribusi terhadap serapan Zn oleh tanaman (Ghasemi *et al.,* 2014). Selain itu, Si memainkan peran penting dalam transportasi Zn ke vakuola dalam sel tumbuhan (Shedeed, 2018).

Penggunaan Si pada sorghum dapat menurunkan akibat yang ditimbulkan karena tanaman mengalami defisiensi K. Defisiensi K pada tanaman dapat menghambat pertumbuhan tanaman, nekrosis pada daun muncul. Pemupukan Si secara signifikan dapat menghambat penurunan berat kering total tanaman sorghum dibawah kondisi defisiensi K, nekrosis pada daun tua juga berkurang dibandingkan tanaman yang tidak diberi Si. Selan itu, defisiensi K yang parah dapat menginduksi konduktansi stomata dan menurunnkan laju transpirasi, sehingga laju fotosintesis menjadi rendah. Akan tetapi, penelitian yang dilakukan menunjukkan tanaman sorghum yang diberikan Si dapat mempertahankan konduktansi stomata yang lebih tinggi dan laju transpirasi sehingga meningkatkan laju fotosintesis (Chen *et al.,* 2016).

Pemberian Si dapat meningkatkan aktivitas enzim antioksidan dan antioksidan non-enzimatik seperti askorbat dan zat osmoregulasi pada sorghum. Tanaman yang diberikan Si menunjukkan kerusakan sel yang lebih rendah. Selain itu, Si dapat mengurangi defisit air pada tanaman, meningkatkan laju fotosintesis, dan hasil (Avila *et al.,* 2021). Aplikasi biochar dapat meningkatkan Si dalam tanaman. Biochar dari jemari dapat meningkatkan konsentrasi Si pada wheat shoots dibandingkan kontrol (Abbas *et al.,* 2017).

Aplikasi biochar jerami padi meningkatkan kelarutan Si dalam tanah, Si tersedia, dan konsentrasi Si pada ujung akar gandum (Qian *et al.,* 2016). Biochar yang berasal dari jerami gandum meningkatkan kandungan Si pada padi lebih banyak dibandingkan kontrol (Liu *et al.,* 2014). Secara keseluruhan, biochar yang berasal dari gandum, sekam dan jerami padi, ampas tebu lebih penting sebagai sumber Si karena hemat biaya dan ramah lingkungan serta manfaat yang ditimbulkan juga besar. Hasil penelitian dengan penggunaan biochar yang berasal dari tempurung kelapa telah terbukti dapat meningkatkan hasil jagung dan sorghum (Sukartono *et al.,* 2015; Adiansyah, 2017).

PhytOC atau *Phytolith Occluded Carbon* ditemukan stabil didalam tanah selama ribuan tahun dan dapat terakumulasi di dalam tanah, sehingga memberikan peluang untuk meningkatkan penyerapan karbon terestrial (Parr dan Sullivan 2005). Beberapa tanaman petenting seperti jagung, padi, sorghum, tebu dan gandum menghasilkan PhtOC (Rajendiran *et al.,* 2012). Sorghum mengakumulasi silika dalam bentuk phytolith. Adanya phytolith dapat meningkatkan kualitas tanaman, hasil, pertumbuhan dan melindungi tanaman dari cekaman biotik dan abiotic (Tripathi *et al.,* 2013).

Adanya Si pada tanaman dapat melindungi tanaman dari cekaman abiotic seperti kekeringan, radiasi, suhu tinggi, sinar UV, cekaman salinitas, toksisitas logam, ketidak seimbangan hara dan lainnya. Fungsi Si sebagai meningkatkan tanaman terhadap kekeringan dengan memelihara tanaman dengan ekseimbangan air, efisiensi fotosintesis, tegaknya daun dan struktur pembuluh xylem di bawah tingkat transpirasi tinggi karena suhu dan kelembaban yang lebih tinggi (Hattori et al., 2005). Kandungan Si pada akar dapat mengurangi pengikatan logam yang mengakibatkan penurunan penyerapan dan translokasi garam dan logam beracun dari akar ke pucuk (Meena et al., 2014).

Pada cekaman kekeringan, pemberian pupuk Si sebanyak 2 mM Si dalam bentuk K2SiO3 dapat meningkatkan pertumbuhan dan fotosintesis pada sorghum (Avila *et al.,* 2020). Sebanyak 3 mmol Si L-1 (K2SiO3) dapat meningkatkan potensi air daun, indek luas daun, klorofil, asimilasi dan laju pertumbuhan relative (Ahmed *et al.,* 2014).

Penggunaan nanopartikel Si dengan dosis 200 ppm memberikan persentasi perkecambahan tertinggi yaitu 98% pada *Sorghum bicolor* (Periakaruppan R et al., 2023). Aplikasi Si pada sorghum berpengaruh terhadap menekan pertumbuhan hama serangga *Schizophis graminum* (Carvalho *et al.,* 1999). Ahmad *et al.,* (2011) melaporkan bahwa peningkatan Si menyebabkan peningkatan indeks luas daun, berat jenis daun, kandungan klorofil, berat kering akar dan daun serta rasio pucuk akar pada kultivar sorghum dibandingkan kontrol.

Aplikasi pupuk Si pada Si dapat meningkatkan hasil gabah dan peningkatan total biomassa (Resende *et al.,* 2013; Yin *et al.,* 2013). Penerapan Si pada tanaman akan menunda infeksi pathogen dan memberikan lebih banyak waktu untuk tanaman mengembangkan respons pertahanan terhadap penyakit (Resende *et al.,* 2013). Respon yang diberikan ini menyebabkan produksi fenolik dan fitoaleksin, serta protein pathogenesis terkait, yaitu terkait dengan peningkatan resistensi inang (Fortunato *et al.,* 2012).

Silikon memiliki dampak yang lebih besar dalam menekan perkembangan antraknosa pada tanah rendah Si. Si memainkan peran penting secara langsung dalam meningkatkan resisten antraknosa pada sorghum, terutama pada tanah yang memiliki kandungan Si rendah pada tanah (Pokhrel, 2016). Pemupukan Si melalui daun pada sorghum efektif dalam meningkatkan penyerapan unsur hara dan pertukaran gas pada tanaman. Nano silica menjadi sumber alternatif untuk Si, dan pilihan yang menjanjikan untuk pemupukan melalui daun karena mendorong penyerapan unsur hara yang tinggi oleh tanaman. Nanosilica juga meningkatkan laju fotosintesis pada tanaman sorghum. Penyemprotan 0.88 gL-1 (Si-alkali) dan 0.84 g L-1 (Si-kalium) pada sorghum pada tahap fenologis (daun melebar) dan awal pembungaan dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman, mengurangi hilangnya air melalui transpirasi, dan memiliki dampak positif terhadap pertukaran gas (de Oliveira *et al.,* 2019). Pemberian Si pada sorghum dapat menekan hama *Atherigona indica* dan Scizaphis graminum, serta pathogen *Colletotrichum graminis* penyebab penyakit Antraknos (Jinger *et al.,* 2020).

Hasil penelitian Taixeira et al., (2020) bahwa Si yang diaplikasikan pada tanah yang memiliki kandungan Fe 368 μmol L-1untuk kondisi kecukupan dan 55,2 μmol L−1 untuk kondisi defisiensi menunjukkan bahwa Si berpengaruh terhadap tanaman sorghum yang rendah akan Fe dengan meningkatkan kandungan klorofil dan menurunkan konsentrasi malondialdehid (MDA). Selain itu, penerapan Si meningkatkan efisiensi translokasi Fe. Si dapat mengurangi defisiensi Fe pada tanaman sorghum dengan meningkatkan konstrasi pigmen fotosintetik, mengurangi peroksida lipid, meningkatkan efisiensi translokasi dan pemanfaatan Fe, serta meningkatkan berat kering tanaman.

Kombinasi pupuk Mn dengan dosis 0, 0.17, 0.34, dan 0.51 g L-1 dengan Si dengan dosis 0.476 g L-1 diaplikasikan pada saat masa vegetative meningkatkan akumulasi mikronutrien, indek klorofil relative, berat kering tanaman jagung. Penyemprotan daun Mn berasosiasi dengan Si dalam larutan, sehingga layak secara agronomis untuk tanaman sorghum (Oliveira *et al.,* 2020).

**Strategi Pengembangan Pupuk Silikon di Masa Depan**

Pengembangan pupuk Si perlu dilakukan, mengingat begitu banyak dampak positif yang ditimbulkan dengan adanya Si pada tanaman. Nanotechnology merupakan salah satu teknologi yang perlu dikembangkan untuk pupuk Si, tidak hanya sebagai pupuk, tetapi bisa digunakan sebagai pestisida dan herbisida. Studi menunjukkan bahwa Si-nanopartikel memiliki potensi untuk merevolusi teknologi yang ada digunakan dalam berbagai sector seperti pertanian dan bioteknologi. Penargetan biomolekul yang dimediasi nanopartikel silikon akan berguna untuk mengembangkan kultivar baru yang tahan terhadap cekaman biotik dan abiotic. Nanoteknologi dapat memberikan alternatif ramah lingkungan dan berkelanjutan (Rastogi *et al.,* 2019).

Nanopartikel silika memiliki ukuran nano, sehingga secara efektif dapat menembus sel dan menginduksi respons mitigasi stress pada tanaman (Bhat *et al.,* 2021; Rajput *et al.,* 2021). Selain itu, nanosilika juga mengatur tekanan osmotic dengan mengerahkannya mempengaruhi translokasi air dan tekanan turgor xylem sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan air pada tanaman (Mahmoud *et al.,* 2022). Selain berdampak langsung terhadap tanaman, nanosilika dapat digunakan untuk senyawa aktif seperti protein, nukleotida, dan kofaktor enzim pada tanaman. Saat ini sensor nanpsilika digunnakan untuk pemantauan kualitas tanah (Rastogi *et al.,* 2019).

Sudah saatnya, pengembangan nanoteknologi dilakukan, dan diaplikasikan ke beberapa tanaman untuk melihat hasil yang ditimbulkan. Ketahanan pangan merupakan salah satu kebutuhan mendasar yang tidak akan pernah bisa diabaikan oleh masyarakat. Peningkatan praktik pertanian yang tidak sesuai dengan peningkatan populasi manusia memiliki konsekuensi bahwa produk pangan akan segera tidak tercukupi. Tekanan yang semakin meningkat menempatkan lahan pertanian mengalami degradasi lahan, perubahan iklim yang dapat menjadi tekanan abiotic seperti kekeringan perlu segera dicarikan solusi (Glick 2014). Nanoteknologi diharapkan menjadi salah satu solusi yang dapat menjawab permasalahan pertanian yang terjadi saat ini, selain efisien dan efektif, nanoteknologi juga menjanjikan pertanian ramah lingkungan.

**KESIMPULAN**

Silikon memiliki peran penting terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman sorghum. Terutama pada kondisi cekaman biotik dan abiotic mampu meningkatkan pertumbuhan dengan adanya pemberian Si. Banyak sumber Si yang dapat dijadikan sebagai pupuk Si. Praktek lebih mudah adalah dengan mengembalikan sisa-sisa panen ke dalam tanah dengan mengolahnya menjadi pupuk Si. Selain murah, mudah, dan juga berkelanjutan.

**DAFTAR PUSTAKA**

Abbas, T., Rizwan, M., Alis S., Rehman MZ., Qayyum, MF., Abbas, F. 2017. Effect of biochar on cadmium bioavailability and uptake in wheat (Triticum aestivum *L.)* grown in a soil with aged contamination. *Ecotoxicol Eviron. Saf.* 140: 37-47.

Adiansyah. 2017. Respon Pertumbuhan Bobot Kering Panen dan Hasil Tanaman Sorgum akibat Pemberian Bahan Pembenah Tanah dan Penerapan Sistem Irigasi di Lahan Kering Lombok Utara (Tesis). Universitas Mataram, Indonesia. [Indonesian]

Ahmed, M.; Hassan, F.; Asif, M. 2014. Amelioration of drought in sorghum (Sorghum bicolor L.) by silicon. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 45: 470–486.

Ahmed M, Ul-Hassen F, Qadeer U, Aslam MA. 2011. Silicon application and drought tolerance mechanism of sorghum. *African Jorunal of Agricultural Research* 6 93): 594-607.

Al-Wabel M, Usman ARA, El-Naggar AH, Aly AA, Ibrahim HM, Elmaghraby S. 2015. Conocarpus biochar as a soil amendment for reducing heavy metals availability and uptake by maize plants. *Saudi J. Biol Sci.* 22: 503-511.

Alikhani T, Tabatabaei SJ, Torkashvand AM, Khalighi A, Talei D. 2020. Morphological and biochemical responses of gerbera (Gerbera jamesonii L.) to application of silica nanoparticles and calcium chelate under hydroponic state. Journal of Ornamental Plants. 10:223-240.

Avila RG, Magalhaes PC, da Silva EM. de Souza RD, Campos CN, de Alvarenga AA, de Souza TC. Application of silicon to irrigated and water deficit sorghum plants increases yield via the regulation of primary, antioxidant, and osmoregulatory metabolism. *Agriculture Water Management* 255: 107004.

Avila, R.G.; Magalhães, P.C.; da Silva, E.M.; Gomes Júnior, C.C.; de Paula Lana, U.G.; de Alvarenga, A.A.; de Souza, T.C. 2020. Silicon supplementation improves tolerance to water deficiency in sorghum plants by increasing root system growth and improving photosynthesis. *Silicon* 12: 2545–2554.

Ayman, M.; Metwally, S.; Mancy, M.; Abd Alhafez, A. Inﬂuence of nano–silica on wheat plants grown in salt–affected soil. J. Product. Dev. 2020, 25, 279–296.

Bhat JA, Rajora N, Raturi G, Sharma S, Dhiman P, Sanand S, Deshmukh R (2021) Silicon nanoparticles (SiNPs) in sustainable agriculture: major emphasis on the practicality, efcacy and concerns. Nanoscale Adv 3(14):4019–4028. https://doi.org/10. 1039/D1NA00233C

Bian R, Joseph S, Cui L, Pan G, Li L, Liu X. 2014. A three-year experiment confirms continuous immobilization of cadmium and contaminant availability of maize plants in a copper and arsenic impacted soil. *Plant Soil* 272: 121-128.

Bocharnikova EA, Matichenkov VV. 2008. Using Si fertilizers for reducing irrigation water application rate. Proceedings of the 3rd Silicon in agriculture conference SCOTTSVILLE, South Africa.

Calabi-Floody, M.; Medina, J.; Rumpel, C.; Condron, L.M.; Hernandez, M.; Dumont, M.; de La Luz Mora, M. Smart fertilizers as astrategy for sustainable agriculture. In Advances in Agronomy; Academic Press—Elsevier: Cambridge, MA, USA, 2018; Volume 147, p. 302.

Calabi-Floody M, Medina J, Rumpel C, Condron LM, Hernandez M, Dumont M, de la Luz Mora M. 2017. Smart fertilizers as a strategy for sustainable agriculture. *Advances in Agronomy*. ISSN 0065-2113. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.10.003>

Carvalho SP, Oraes JC, Carvalho JG (1999) Efeito do silicio na Resistencia do sorgo (Sorghum bicolor) ao pulgao verde Schizaphis graminum(Rond)(Hemiptera: Aphododae). Anais da Sociedade Entomologica Do Brasil 28:505–510.

Chen D, Cao B, Wang S, Liu P, Dng X, Yin L, Zhang S. 2016. Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. *Scientific Reports* 6 (22882): 1-14.

Chhipa H. 2017. Nanofertilizers and nanopesticides for agriculture. Environ. Chem. Lett. 15:15-22

Hadebe, S., A. Modi and T. Mabhaudhi. 2017. Drought tolerance and water use of cereal crops: a focus on sorghum as a food security crop in sub‐Saharan Africa. Journal of Agronomy and Crop Science. 203:177-191.

de Oliveira, R.L.L., de Mello Prado, R., Felisberto, G. *et al.* Different Sources of Silicon by Foliar Spraying on the Growth and Gas Exchange in Sorghum. *J Soil Sci Plant Nutr* **19**, 948–953 (2019). https://doi.org/10.1007/s42729-019-00092-1

de Moraes, A.C.P.; Lacava, P.T. Chapter 5—Use of silicon and nano-silicon in agro-biotechnologies. In Silicon and Nano-Silicon in Environmental Stress Management and Crop Quality Improvement; Etesami, H., Al Saeedi, A.H., El-Ramady, H., Fujita, M., Pessarakli, M., Anwar Hossain, M., Eds.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2022; pp. 55–65.

de Farias Guedes VH, Prado R de Mello, Feazao JJ, Oliveira KS, Cazetta JO. 2022. Foliar-Applied Silicon in Sorghum (Sorghum bicolor L.) Alleviate Zinc Deficiency. *Silicon* 14 : 281-287.

El-Saadony, M.T.; Desoky, E.-S.M.; Saad, A.M.; Eid, R.S.M.; Selem, E.; Elrys, A.S. Biological silicon nanoparticles improve Phaseolus vulgaris L. yield and minimize its contaminant contents on a heavy metals-contaminated saline soil. J. Environ. Sci. 2021, 106, 1–14.

Etesami H, Jeong BR. 2018. Silicon (Si) review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. Ecotoxicol Environ Saf 147(Supplement C):881–896. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.063>

Etesami H (2018) Can interaction between silicon and plant growth promoting rhizobacteria beneft in alleviating abiotic and biotic stresses in crop plants? Agric Ecosyst Environ 253:98–112. https ://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.007

Ghanem, H.E., H.S. Aldesuquy and H.A. Elshafii. 2019. Silicon alleviates alkalinity stress of sorghum (Sorghum Bicolor L.) plants by improving plant water status, pigments, protein, nucleic acids and carbohydrates contents. Advances in Agricultural Technology and Plant Sciences Journal. 2:180027.

Ghasemi ML, Normohamadi G, Madani H, Sharifabad HH, Mobasser HR (2014) Effect of silicon and potassium foliar application and nitrogen rates on yield and yield components of Iranian rice cultivars, Tarom Hashemi and Tarom Mahalli. Journal of New Finding in Agriculture 9(1):47–66 28.

Glick, B.R.2014 Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. *Microbiological Research* 169 (1): 30-39.

Hattori T, Inanaga S, Araki H, An P, Mortia S, Luxova M, Lux A (2005) Application of silicon enhanced drought tolerance in Sorghum bicolor. Physio Plantarum 123:459–466.

Hurtado AC, Chiconato DA, de Mello Prado R, Junior G, Viciedo DO, Diaz YP, Calzada KP, Gratao PL. 2021. Silicon alleviates sodium toxicity in sorghum and sunflower plants by enhancing ionic homeostasis in roots and shoots and increasing dry matter accumulation. *Silicon* 13: 475-486. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00449-7>

Jahanzad, E., M. Jorat, H. Moghadam, A. Sadeghpour, M.R. Chaichi and M. Dashtaki. 2013. Response of a new and a commonly grown forage sorghum cultivar to limited irrigation and planting density. Agricultural Water Management Journal. 117:62-69.

Jeelani PG, Mulay P, Venkat R, Ramalingam C (2020) Multifaceted application of silica nanoparticles. A Review Silicon 12(6):1337–1354. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00229-y>

Jinger D, Dhar S, Vijayakumar S, Pande VC, Kakade V, Jat RA, Dinesh D. 2020. Silicon nutrition of graminaceous crops. *Indian Journal* 70 (10): 18-21.

Kalteh, M., Z.T. Alipour, S. Ashraf, M. Marashi Aliabadi and A. Falah Nosratabadi. 2014. Effect of silica nanoparticles on basil (Ocimum basilicum L.) under salinity stress. Journal of Chemical Health Risks. 4:49-55.

Kalia A, Sharma SP, Kaur H. 2019. Nanoscale fertilizers: harnessing boons for enhanced nutrient use efficiency and crop productivity. In: K.A. Abd-Elsalam, R. Prasad, (eds.) Nanobiotechnology Applications in Plant Protection. Springer, Cham, Switzerland, pp 191-208.

Kazemi, E., Ganjali, H.R., Mehraban, A. *et al.* Yield and biochemical properties of grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) affected by nano-fertilizer under field drought stress. *CEREAL RESEARCH COMMUNICATIONS* **50**, 397–405 (2022). <https://doi.org/10.1007/s42976-021-00198-2>

Kovacs S, Kutasy E, Csajbok J. 2022. The Multiple Role of Silicon Nutrition in Alleviating Environmental Stresses in Sustainable Crop Production. *Plants* 11 (1223): 1-22.

Liang Y, Si J, Romheld V. 2005. Silicon uptake and transport is an active process in ¨ Cucumis sativus. New Phytologist 167: 797–804.

Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y.-G., Christie, P., 2007. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. Environ. Poll. 147, 422–428.

Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H., Song, A., 2015. Silicon in Agriculture: From Theory to Practice. Springer.

Liu, L., Tan, Z., Zhang, L., Huang, Q., 2017. Influence of pyrolysis conditions on nitrogen speciation in a biochar ‘preparation-application’process. J. Energy Inst. . Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.joei.2017.09.004>.

Liu X, Li L, Bian R, Chen D, Qu J, Wanjiru Kibue G. 2014. Effect of biochar amandment on soil-silicon availability and rice uptake. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.* 177: 91-96.

Mahmoud LM, Shalan AM, El-Boray MS, Vincent CI, El-Kady ME, Dutt GJW (2022) Application of silicon nanoparticles enhances oxidative stress tolerance in salt stressed ‘Valencia’sweet orange plants. Sci Hortic 295:110856. https://doi.org/10.1016/j.scienta. 2021.110856

Meena, V., Dotaniya, M., Coumar, V., Rajendiran, S., Kundu, S., Rao, A.S., 2014. A case for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils. *Proc. Natl. Acad. Sci.,India Sect. B: Biol. Sci.* 84, 505–518.

Mitani N, Ma JF (2005) Uptake system of silicon in diferent plant species. J Exp Bot 56(414):1255–1261

Oliveira, K.S., de Mello Prado, R. & de Farias Guedes, V.H. Leaf Spraying of Manganese with Silicon Addition Is Agronomically Viable for Corn and Sorghum Plants. *J Soil Sci Plant Nutr* **20**, 872–880 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00173-6>

Parr, J.; Sullivan, L. Soil carbon sequestration in phytoliths. *Soil Biol. Biochem.* **2005**, *37*, 117–124. Pokhrel, S. 2016. Influence of silicon on the development of anthracnose of grain sorghum. LSU’s Mater Theses. 4608. <https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_theses/4608>

Parveen, A.; Mumtaz, S.; Saleem, M.H.; Hussain, I.; Perveen, S.; Thind, S. Silicon and nanosilicon mediated heat stress tolerance in plants. In Silicon and Nano-Silicon in Environmental Stress Management and Crop Quality Improvement; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2022; pp. 153–159.

Periakaruppan R, Devi NR, Abed SA, Vanathi P, Kumar JS. 2023. Production of biogenic silica nanoparticles by green chemistry approach and assessment of their physicochemical properties and efects on the germination of sorghum bicolor. *Silicon* . Springer. <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02348-z>

Qian L, Chen B, Chen M. 2016. Novel alleviation mechanisms of aluminium phytotoxicity via released biosilicon from rice straw-derived biochars. *Sci.Rep.* 6: 29346.

Rastogi, A., Tripathi, D.K., Yadav, S., Chauhan, D.K., Zivcak, M., Ghorbanpour, M., El-Sheery N.I., Brestic, M. 2019. Application of silicon nanoparticle in agriculture. *Biotech* 9: 90.

Raimondi, G.; Maucieri, C.; Toffanin, A.; Renella, G.; Borin, M. Smart fertilizers: What should we mean and where should we go? Ital. J. Agron. 2021, 16, 1794.

Rajendiran, S.; Coumar, V.; Kundu, S.; Dotaniya, M.L.; Rao, A.S. Role of phytolith occluded carbon of crop plants for en-hancing soil carbon sequestration in agro-ecosystems. *Curr. Sci.* **2012**, *103*, 911–920.

Rajput VD, Minkina T, Feizi M, Kumari A, Khan M, Mandzhieva S, Choudhary R (2021) Efects of silicon and silicon-based nanoparticles on rhizosphere microbiome, plant stress and growth. Biol 10(8):791. https://doi.org/10.3390/biology10080791

Reynolds, O. L., Padula, M. P., Zeng, R. and Gurr, G. M. (2016): Silicon: potential to promote direct and indirect effects on plant defense against arthropod pests in agriculture. Front. Plant Sci. 7, 744 p.

Rizal, G., S. Karki, M. Alcasid, F. Montecillo, K. Acebron, N. Larazo, R. Garcia, I.H. Slamet‐Loedin and W.P. Quick. 2014. Shortening the breeding cycle of sorghum, a model crop for research. Crop Science Journal. 54:520- 529.

Sakr, N. (2016a): Silicon control of bacterial and viral diseases in plants. J. Plant Prot. Res. 56, 331–336.

Sarkar S, Datta SC, Biswas DR. 2014. Synthesis and characterization of nanoclay–polymer composites from soil clay with respect to their water-holding capacities and nutrientrelease behaviour. J. Appl. Polym. Sci. 131:39951

Scrinis, G.; Lyons, K. The emerging nano-corporate paradigm: Nanotechnology and the transformation of nature, food and agri-food systems. Int. J. Sociol. Agric. Food 2007, 15, 22–44.

Shedeed SI (2018) Assessing effect of potassium silicate consecutive application on forage maize plants (Zea mays L.). J. Innov Pharm Biol Sci 5(2):119–127

Sukartono, Suwardji, dan Ridwan. (2015). Pemanfaatan Kompos dan Biochar sebagai Bahan Pembenah Tanah Lahan Bekas Penambangan Batu Apung di Pulau Lombok. Agronomi Teknologi Dan Sosial Ekonomi Pertanian, 25(1), 1-11.

Suriyaprabha, R.; Karunakaran, G.; Yuvakkumar, R.; Prabu, P.; Rajendran, V.; Kannan, N. Growth and physiological responses of maize (Zea mays L.) to porous silica nanoparticles in soil. J. Nanopart. Res. 2012, 14, 1294.

Teixeira GCM, de Mello Prado R, Oliveira KS, D’Amico-Damiao V, da Silveira Sousa Junior G. 2020. Silicon increases leaf chlorophyll content and iron nutritional efficiency and reduces iron deficiency in sorghum plants. Journal of Soil Science and Plant Nutrition (2020) 20:1311–1320. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00214-0>

Tripathi DK, Mishra S, Chauhan DK, Tiwari SP, Kumar C (2013) Typological and frequency based study of opaline silica (phytolith) deposition in two common Indian sorghum. Proc Natl Acad Sci India Sec B 83(1):97–104.

Yassen, A.; Abdallah, E.; Gaballah, M.; Zaghloul, S. Role of silicon dioxide nano fertilizer in mitigating salt stress on growth, yield and chemical composition of cucumber (Cucumis sativus L.). Int. J. Agric. Res. 2017, 22, 130–135.

Zarooshan, M., Abdolzadeh, A., Sadeghipour, H,R., Mehrabanjoubani, P. 2021. Effect of silicon and nano silicon application on wheat (C3) and sorghum (C4) under salinity stress. *Journal of Plant Production* 29 (1): 173-190.

Sakr, N. (2017): The role of silicon (Si) in increasing plant resistance against insect pests. Acta Phytopathol. et Entomol. Hung. 52, 185–204.

Wang Y, Xiao X, Chen B. 2018. Biochar impacts on soil silicon dissolution kinetics and their interaction mechanism. *Sci. Rep* 321: 22-31.