

Pemupukan Silikon dalam Meningkatkan Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Sorgum

Silicone Fertilization in Increasing The Growth and Yield of Sorghum Plant

Mirawanty Amin^{1*)}, Ronny Mulyawan², Putri Tria Santari¹, Sri Wahyuni Manwan³,
Rahadian Adi Prasetyo⁴

¹Pusat Riset Tanaman Pangan, Organisasi Riset Pertanian dan Pangan,
Badan Riset dan Inovasi Nasional, Cibinong Science Center - Botanical Garden,
Jl. Raya Jakarta-Bogor No.KM. 46, Cibinong, Bogor Regency, 16911

²Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru
Jl. A. Yani km 36, Banjarbaru, Kalimantan Selatan, 70714

³Pusat Riset Hortikultura dan Perkebunan, Organisasi Riset Pertanian dan Pangan,
Badan Riset dan Inovasi Nasional, Cibinong Science Center - Botanical Garden,
Jl. Raya Jakarta-Bogor No.KM. 46, Cibinong, Bogor Regency, 16911

⁴Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman
Jl. Pasir Balengkong, Gn Kelua, Kota Samarinda 75117, Kalimantan Timur

*Penulis untuk korespondensi E-mail: aminmirawanty@gmail.com

Diajukan: 18 Oktober 2022 /Diterima: 30 September 2023 /Dipublikasi: 28 November 2023

ABSTRACT

Continuous use of Silicon (Si) without fertilizing inputs can cause the available Si in the soil to decrease. Low Si content can be a limiting factor for a plant to decrease yields. Si is a useful element that is needed by sorghum for its growth. Sorghum is a good alternative crop, especially in dry areas, so it often experiences air deficit stress. The use of Si can reduce the harmful effects of biotic stresses such as pests and diseases, and abiotic stresses such as salinity, drought, nutrient deficiency, and heavy metals. The importance of Si in plants is a concern for researchers to produce research on Si fertilization in plants. Nanotechnology is an environmentally friendly fertilization technique that is currently being developed due to its efficiency, environmental friendliness, and sustainability. However, there is still much that is not known about the role of Si in plants, sources of Si, and Si fertilization in sorghum. So comprehensive information is needed regarding the role of Si in fertilization in sorghum.

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

INTISARI

Penggunaan Silikon (Si) secara terus-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. Silikon merupakan *beneficial element* yang sangat dibutuhkan oleh sorgum terhadap pertumbuhannya. Sorgum merupakan tanaman alternatif yang baik terutama di daerah kering, sehingga sorgum sering mengalami cekaman defisit air. Penggunaan Si dapat menurunkan efek bahaya dari cekaman biotik seperti hama dan penyakit, dan cekaman abiotik seperti salinitas, kekeringan, defisiensi hara, dan logam berat. Pentingnya Si pada tanaman menjadi perhatian bagi para peneliti untuk menghasilkan penelitian tentang pemupukan Si pada tanaman. Nanoteknologi merupakan teknik pemupukan ramah lingkungan yang saat ini dikembangkan karena sifatnya yang efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan. Akan tetapi, masih banyak yang belum mengetahui tentang peran Si pada tanaman, sumber Si, dan pemupukan Si pada sorgum. Sehingga diperlukan informasi secara menyeluruh terkait peran Si hingga pemupukan pada sorgum.

Kata kunci: cekaman, hasil; pertumbuhan; pupuk; silikon; sorgum.

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). Sorgum (*Sorghum bicolor* L) merupakan salah satu tanaman yang tumbuh di daerah kering di Asia dan Afrika karena dapat bertahan dalam kondisi kekeringan (Ahmed *et al.*, 2011). Sorgum sebagai tanaman sereal pilihan yang lebih memadai, kondisi lingkungan yang menjadi faktor pembatas bagi beberapa tanaman, namun sorgum 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 sorgum terhadap kekeringan (Kalteh *et al.*, 2014; Ghanem *et al.*, 2019). Silikon juga meningkatkan berat segar dan kering dengan meningkatkan morfologi daun dan bunga seperti penambahan 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 pada dinding sel yang menjadi penghalang dari serangan patogen dan serangan hama atau perubahan biokimia yang terkait pertahanan tanaman (Reynolds *et al.*, 2016; Sakr 2016; Sakr 2017).

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

HASIL DAN PEMBAHASAN

Silikon pada Tanaman

Sebagian besar Si di tanah, dijumpai dalam bentuk kristal aluminosilikat tidak larut, yang tidak dapat diserap oleh tanaman (Liang *et al.*, 2015). Tanaman menyerap Si dalam bentuk asam monosilikat (H_4SiO_4) melalui difusi dan aliran massa. Konsentrasi Si di xilem pada beberapa tanaman biasanya berkali-kali lipat lebih tinggi daripada larutan tanah, sehingga menunjukkan penyerapan Si didorong secara metabolik (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 esensial, Si memiliki peran penting dalam metabolisme atau aktivitas fisiologis, pertumbuhan tanaman, dan cekaman biotik dan abiotik (Liang *et al.*, 2015). Selain itu, Si juga berkontribusi pada beberapa mekanisme tanaman seperti defisiensi nutrisi, perlindungan struktural membran kloroplas, endapan silika pada dinding sel yang membuat daun menjadi tegak, meningkatkan intersepsi cahaya, meningkatkan fotosintesis (Gonzalo *et al.*, 2013), dan meningkatkan mikronutrien (Bityutskii *et al.*, 2014).

Sumber Silikon

Sorgum dapat mengakumulasi Si pada jaringan tanaman berkisar antara 8-20 g kg⁻¹ (Resende *et al.*, 2013). Si memberikan pengaruh positif terhadap sorgum melalui fiksasi karbon, meningkatkan sistem antioksidan, dan meningkatkan ketahanan tanaman terhadap *C. sublineolum* (Resende *et al.*, 2012). 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 jumlah yang berbeda, tergantung pada jenis tanaman. Telah dilakukan penelitian bahwa daun dan batang jagung, sorgum 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).

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). Selain itu, penggunaan sumberdaya yang ada seperti sisa panen untuk menghasilkan bahan silika perlu dilakukan. Silika amorf yang terakumulasi yang disebut *Phytolith* ditemukan di sisa-sisa tanaman yang dibuang selama panen. Oleh karena itu, akan bermanfaat jika kita memahami potensi berbagai jenis sisa tanaman yang digunakan sebagai produksi silika Aplikasi silika yang berasal dari sisa tanaman bervariasi tergantung pada karakteristiknya yaitu tekstur dan morfologi (Tabel 2).

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

Produk Industri	Batu	Bahan lainnya
terak baja karbon (<i>carbon steel slag</i>)	Tuff vulkanik	Kalsium silikat
baja besi (<i>iron steel</i>)	terak wollastonit	Magnesium silikat
terak baja tahan karat (<i>stainless steel slag</i>)	olivin	Kalium silikat
Terak feronikel	Zeolit alami	kalsium silikat berpori hidrat
Terak tanur	piroksen	Gel silika
Terak mangan		Leburan kalium magnesium silikat
Terak fosfor		Pupuk silikat larut

Tabel 2. Hasil ekstraksi silika dari beberapa sisa panen tanaman

Residu tanaman	Rasio residu (kg residu/kg tanaman)	Rasio abu dalam residu (g abu/kg residu)	Rasio silika pada abu (g silika/ g abu)	Rasio silika pada residu (g silika/ kg residu)	Hasil (g silika/ kg tanaman)
Sekam padi ^a	0.20	218.90	0.91	199.75	39.95
Jerami ^b	1.00	95.60	0.80	76.31	76.31
Ampas sorgum ^c	0.30	23.00	0.40	9.24	2.77
Sekam sorgum ^d	0.15	40.00	0.78	31.28	4.69
Ampas tebu ^e	0.30	31.00	0.53	16.46	4.94
Daun tebu ^f	0.25	102.60	0.80	82.22	20.56

Keterangan: ^aAzat *et al.*,2019 ;^bLim *et al.*, 2012; ^cAppiah-Nkansah *et al.*,2019 ;^dChandraju *et al.*,2013 ;^eAnukam *et al.*,2016; ^fKumar *et al.*, 2019

Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2, jerami padi dan sekam padi memiliki hasil silika tertinggi; silika sebanyak 76 g kg⁻¹ tanaman dan masing-masing 40 g silika kg tanaman⁻¹. *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

Tabel 3. Berbagai dosis pupuk Nano silika dan metode aplikasi

Partikel nano (bentuk Si)	Dosis	Aplikasi	Referensi
nSiO ₂	60 mg L ⁻¹	Daun	Yasen <i>et al.</i> , 2017
nSiO ₂	600 mg L ⁻¹ , 80 mg kg ⁻¹	Daun, akar	Ayman <i>et al.</i> , 2018
nSiO ₂	900 mg L ⁻¹	Daun	El-Saadony <i>et al.</i> , 2021
nSiO ₂	15 kg ha ⁻¹	Tanah	Suriyaprabha <i>et al.</i> , 2012

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 produksi pangan global yang telah menjadi topik penelitian untuk setiap sektor 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 abiotik dan bersifat berkelanjutan (Parveen *et al.*, 2022). Beberapa pupuk Nano Si telah banyak dilakukan penelitian terhadap tanaman dan memberikan respon yang positif terhadap pertumbuhan tanaman (Tabel 3).

Nano fertilizer merupakan pupuk yang berskala nano berkisar 1 hingga 100 nm, nanoclay dan nanopartikel mikronutrien berukuran 200-500 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 Sorgum

Sorgum merupakan tanaman yang termasuk famili Poaceae, dapat mengakumulasi Si dalam jumlah yang besar (Mitani dan Ma, 2005), karena mengakumulasi Si dalam jumlah yang banyak, sehingga sorgum dapat meningkatkan ketahanan terhadap cekaman biotik dan abiotik (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).

Tabel 4. Mekanisme penggunaan Si pada berbagai cekaman pada sorgum

Kondisi Cekaman	Respon pemberian Si	Referensi
Salinitas	Konsentrasi Na ⁺ menurun pada tanaman yang diberi perlakuan Si, serapan K ⁺ meningkat	Yin <i>et al.</i> , 2013
	Status air tanaman, kandungan protein, asam nukleat, karbohidrat membaik	Ghanem <i>et al.</i> , 2015
	Kandungan etilen berkurang	Yin <i>et al.</i> , 2016
	Tingkat transpirasi, fotosintesis, pigmen keseluruhan, dan akumulasi bahan kering meningkat	Nabati <i>et al.</i> , 2013
	Penyerapan air meningkat	Hattori <i>et al.</i> , 2005
Kekeringan	Efisiensi penggunaan air dan berat kering tanaman meningkat	Niyazi, 2018
	Potensi osmotik akar berkurang dan penyerapan air meningkat melalui osmolit seperti gula larut dan asam amino (alanin dan asam glutamat)	Sonobe <i>et al.</i> , 2010
	Potensi air daun tetap terjaga karena adanya lapisan ganda silika-kutikula pada sel epidermis daun	Coskun <i>et al.</i> , 2016
	Fungsi fisiologis seperti laju asimilasi bersih, indeks luas daun, kandungan klorofil dan transpirasi lebih terjaga	Ahmed <i>et al.</i> , 2014
Cekaman Al	Pertumbuhan akar meningkat dengan cara mengikat Al pada mucigel sehingga tidak menghambat pemanjangan sel	Kopittke <i>et al.</i> , 2017
Defisiensi Fe	Kandungan klorofil meningkat	Teixeira <i>et al.</i> , 2020
Defisiensi Zn	Akumulasi Zn, pigmen fotosintetik, berat kering akar dan pucuk meningkat	de Farias Guedes <i>et al.</i> , 2020
Defisiensi Mn	Bahan kering, aktivitas fotosintesis, efisiensi penggunaan Mn, aktivitas superoksida dismutase meningkat	de Oliveira <i>et al.</i> , 2019

Kondisi Cekaman	Respon pemberian Si	Referensi
Anthracoze (<i>Colletotrichum sublineolum</i>)	Penetrasi pada daun sorgum diperlambat atau dicegah, dan perlawanan diberikan melalui mekanisme biokimia	Resende <i>et al.</i> , 2013
<i>Alternaria alternata</i>	penetrasi hifa ke dalam protoplas menurun	Bathoova <i>et al.</i> , 2021
	Penyebaran hifa jamur terbatas (mungkin karena suberin yang dimediasi Si dan deposisi fenolat di eksodermis jaringan akar)	Bathoova <i>et al.</i> , 2018

Penggunaan pupuk Si ramah lingkungan sebagai strategi yang dapat mendorong pertumbuhan dan meningkatkan kemampuan tanaman terhadap berbagai cekaman. Hasil penelitian telah menunjukkan penggunaan Si meminimalkan efek berbahaya dari stress biotik seperti bakteri, jamur, dan hama, dan stress abiotik termasuk salinitas, kekeringan, nutrisi, dan logam berat. Peran Si dalam mitigasi cekaman abiotik dan biotik pada sorgum dibahas pada Tabel 4.

Pemberian nanosilika meningkatkan berat segar dan berat kering pada sorgum yang tercekam salinitas. Nanosilika dapat meningkatkan 75% berat kering dibandingkan tanpa penggunaan nanosilika pada tanaman sorgum. Selain itu, penggunaan nanosilika dapat menurunkan jumlah kandungan hidrogen peroksida sebesar 21% dan 30%, jumlah peroksidasi lipid sekitar 13% dan 23% pada tanaman sorgum (Zarooshan *et al.*, 2021).

Pemupukan Si melalui daun pada tanaman sorgum dapat menurunkan efek

yang ditimbulkan akibat defisiensi Zn. 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 sorgum dapat meningkatkan K pada tanaman yang 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 sorgum pada kondisi defisiensi K, nekrosis pada daun tua juga berkurang dibandingkan tanaman yang tidak diberi Si. Selain itu, defisiensi K yang parah dapat menginduksi konduktansi stomata dan menurunkan laju transpirasi, sehingga laju

fotosintesis menjadi rendah. Penelitian yang telah dilakukan menunjukkan tanaman sorgum 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 sorgum. 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 jerami dapat meningkatkan konsentrasi Si pada *wheat shoots* dibandingkan tanpa menggunakan biochar (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 sorgum (Sukartono *et al.*, 2015; Adiansyah, 2017).

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

Adanya Si pada tanaman dapat melindungi tanaman dari cekaman abiotik 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 keseimbangan air, efisiensi fotosintesis, tegaknya daun dan struktur pembuluh xilem 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 K_2SiO_3 dapat meningkatkan pertumbuhan dan fotosintesis pada sorgum (Avila *et al.*, 2020). Sebanyak 3 mmol Si L⁻¹ (K_2SiO_3)

dapat meningkatkan potensi air daun, indeks luas daun, klorofil, asimilasi dan laju pertumbuhan relatif (Ahmed *et al.*, 2014).

Penggunaan nanopartikel Si dengan dosis 200 ppm memberikan persentase perkecambah tertinggi yaitu 98% pada *Sorgum bicolor* (Periakaruppan *et al.*, 2023). Aplikasi Si pada sorgum berpengaruh terhadap menekan pertumbuhan hama serangga *Schizaphis 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 sorgum dibandingkan kontrol.

Aplikasi pupuk Si dapat meningkatkan hasil gabah dan peningkatan total biomassa (Resende *et al.*, 2013; Yin *et al.*, 2013). Penerapan Si pada tanaman akan menunda infeksi patogen 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 berperan penting secara langsung dalam meningkatkan resisten antraknosa pada sorgum, terutama pada tanah yang memiliki kandungan Si tanah rendah (Pokhrel, 2016). Pemupukan Si melalui daun pada sorgum

efektif dalam meningkatkan penyerapan unsur hara dan pertukaran gas pada tanaman. Nano silika menjadi sumber alternatif untuk Si, dan pilihan yang menjanjikan untuk pemupukan melalui daun karena mendorong penyerapan unsur hara yang tinggi oleh tanaman. Nanosilika juga meningkatkan laju fotosintesis pada tanaman sorgum. Penyemprotan 0.88 g L⁻¹ (Si-alkali) dan 0.84 g L⁻¹ (Si-kalium) pada sorgum 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 sorgum dapat menekan hama *Atherigona indica* dan *Scizaphis graminum*, serta patogen *Colletotrichum graminis* penyebab penyakit Antraknosa (Jinger *et al.*, 2020).

Hasil penelitian Teixeira *et al.*, (2020) bahwa Si yang diaplikasikan pada tanah yang memiliki kandungan Fe 368 µmol L⁻¹ dalam kondisi cukup dan 55,2 µmol L⁻¹ untuk kondisi defisiensi menunjukkan bahwa Si berpengaruh terhadap tanaman sorgum yang rendah akan Fe dengan meningkatkan kandungan klorofil dan menurunkan konsentrasi malondialdehid (MDA). Selain itu, penerapan Si meningkatkan efisiensi translokasi Fe. Silikon dapat mengurangi defisiensi Fe pada tanaman sorgum dengan meningkatkan konsentrasi 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 vegetatif meningkatkan akumulasi mikronutrien, indeks klorofil relative, berat kering tanaman jagung. Penyemprotan daun Mn berasosiasi dengan Si dalam larutan, sehingga layak secara agronomis untuk tanaman sorgum (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. Nanoteknologi 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 sektor seperti pertanian dan bioteknologi. Penargetan biomolekul yang dimediasi nanopartikel silikon akan berguna untuk mengembangkan kultivar baru yang tahan terhadap cekaman biotik dan abiotik. 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 melalui partikel-partikel nano digunakan oleh tanaman untuk

meningkatkan pertumbuhan dengan mempengaruhi kelembaban xilem, translokasi air, dan peningkatan tekanan turgor, yang pada akhirnya dapat meningkatkan kandungan air dan efisiensi penggunaan air (El-Saadony *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 nanosilika digunakan 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 abiotik 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 sorgum. Terutama pada kondisi cekaman biotik dan abiotik 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., Zia-ur-Rehman, M., Qayyum, M.F., Abbas, F., Hannan, F., Rinklebe, J., Sik, Ok, Y.S. 2017. Effect of biochar on cadmium bioavailability and uptake in wheat (*Triticum aestivum L.*) grown in a soil with aged contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 140, 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.02.028>
- 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., Fayyaz-ul-Hassan., Asif, M. 2014. Amelioration of drought in sorgum (*Sorgum bicolor L.*) by silicon. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 45(4), 470-486. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.863907>
- Ahmed, M., Asif, M., Hassan, F. U. (2014). Augmenting drought tolerance in sorgum by silicon nutrition. *Acta physiologiae plantarum*, 36, 473-483.
- Ahmed M., Hassen F.U., Qadeer, U., Aslam, M.A. 2011. Silicon application and drought tolerance mechanism of sorgum. *African Journal of Agricultural Research* 6 (3), 594-607.
- Al-Wabel, M.I., Usman, A.R., El-Naggar, A.H., Aly, A.A., Ibrahim, H.M., Elmaghraby, S., Al-Omran, A. 2015. Conocarpus biochar as a soil amendment for reducing heavy metals availability and uptake by maize plants. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22(4), 503-511. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.12.003>
- Alikhani, T.T., Tabatabaei, S.J., Torkashvand, A.M., 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(4), 223-240.
- Anukam, A., Mamphweli, S., Reddy, P., Meyer, E., Okoh, O. 2016. Pre-processing of sugarcane bagasse for gasification in a downdraft biomass gasifier system: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 775-801. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.046>
- Appiah-Nkansah, N. B., Li, J., Rooney, W., Wang, D. 2019. A review of sweet sorgum as a viable renewable bioenergy crop and its techno-economic analysis. *Renewable Energy*, 143, 1121-1132. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.066>

- Avila, R.G., Magalhães, P.C., da Silva, E.M., de Souza, K.R., D., Campos, C.N., de Alvarenga, A.A., de Souza, T.C. 2021. 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. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107004>
- 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. 2020. Influence of nano-silica on wheat plants grown in salt-affected soil. *Journal of Productivity and Development*, 25(3), 279–296. DOI: [10.21608/JPD.2020.120786](https://doi.org/10.21608/JPD.2020.120786)
- Azat, S., Korobeinyk, A. V., Moustakas, K., Inglezakis, V. J. 2019. Sustainable production of pure silica from rice husk waste in Kazakhstan. *Journal of cleaner production*, 217, 352-359. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.142>
- Bathoova, M., Bokor, B., Soukup, M., Lux, A., Martinka, M. 2018. Silicon-mediated cell wall modifications of sorghum root exodermis and suppression of invasion by fungus *Alternaria alternata*. *Plant Pathology*, 67(9), 1891-1900. <https://doi.org/10.1111/ppa.12906>
- Bathoova, M., Švubová, R., Bokor, B., Neděla, V., Tihlaříková, E., Martinka, M. 2021. Silicon triggers sorghum root enzyme activities and inhibits the root cell colonization by *Alternaria alternata*. *Planta*, 253, 1-14.
- Bhat, J.A., Rajora, N., Raturi, G., Sharma, S., Dhiman, P., Sanand, S., Shivaraj, S.M., Sonah, H., Deshmukh, R. 2021. Silicon nanoparticles (SiNPs) in sustainable agriculture: major emphasis on the practicality, efficacy and concerns. *Nanoscale Advances*, 3(14), 4019–4028. <https://doi.org/10.1039/D1NA00233C>
- Bian, R., Joseph, S., Cui, L., Pan, G., Li, L., Liu, X., Zhang, A., Rutledge, H., Wong, S., Chia, C., Marjo C., Gong, B., Munroe, P., Donne, S. 2014. A three-year experiment confirms continuous immobilization of cadmium and lead in contaminated paddy field with biochar amendment. *Journal of Hazardous Materials*, 272, 121-128. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.03.017>
- Bityutskii, N., Pavlovic, J., Yakkonen, K., Maksimović, V., Nikolic, M. 2014. Contrasting effect of silicon on iron, zinc and manganese status and accumulation of metal-mobilizing compounds in micronutrient-deficient cucumber. *Plant physiology and Biochemistry*, 74, 205-211. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.11.015>
- Bocharnikova, E. A., Matichenkov, V. 2008. Using Si fertilizers for reducing irrigation water application rate. In *Proceedings of the 3rd Silicon in agriculture conference SCOTTSVILLE, South Africa. CGIAR(2007)*.
- Carvalho, S. P., Moraes, J. C., Carvalho, J. G. 1999. Efeito do silício na resistência do sorgo (*Sorghum bicolor*) ao pulgão-verde *Schizaphis graminum* (Rond.)(Homoptera: Aphididae). *Anais da Sociedade Entomológica do Brasil*, 28, 505-510. <https://doi.org/10.1590/S0301-80591999000300017>
- Chandrabu, S., Venkatesh, R., Kumar, C. C., Res, J. C. P. 2013. Estimation of sugars by acid hydrolysis of sorghum husk by standard methods. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 5(12), 1272-1275.

- Chen, D., Cao, B., Wang, S., Liu, P., Deng, X., Yin, L., Zhang, S. 2016. Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. *Scientific reports*, 6(1), 22882.
- Chhipa, H. 2017. Nanofertilizers and nanopesticides for agriculture. *Environmental chemistry letters*, 15, 15-22.
- Coskun, D., Britto, D. T., Huynh, W. Q., Kronzucker, H. J. 2016. The role of silicon in higher plants under salinity and drought stress. *Frontiers in plant science*, 7, 1072.
- de Oliveira, R. L. L., de Mello Prado, R., Felisberto, G., Checchio, M. V., Gratão, P. L. 2019. Silicon mitigates manganese deficiency stress by regulating the physiology and activity of antioxidant enzymes in sorghum plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19, 524-534.
- de Oliveira, R. L. L., de Mello Prado, R., Felisberto, G., Cruz, F. J. R. 2019. Different sources of silicon by foliar spraying on the growth and gas exchange in sorghum. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19, 948-953. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00092-1>
- de Moraes, A. C. P., Lacava, P. T. 2022. Use of silicon and nano-silicon in agrobiotechnologies. In *Silicon and Nano-silicon in Environmental Stress Management and Crop Quality Improvement* (pp. 55-65). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91225-9.00017-0>
- de Farias Guedes, V. H., de Mello Prado, R., Frazão, J. J., Oliveira, K. S., & Cazetta, J. O. 2020. Foliar-applied silicon in sorghum (*Sorghum bicolor* L.) alleviate zinc deficiency. *Silicon*, 1-7.
- El-Saadony, M. T., Desoky, E. S. M., Saad, A. M., Eid, R. S., Selem, E., Elrys, A. S. 2021. Biological silicon nanoparticles improve *Phaseolus vulgaris* L. yield and minimize its contaminant contents on a heavy metals-contaminated saline soil. *Journal of Environmental Sciences*, 106, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.01.012>
- El-Saadony, M.T., Saad, A.M., Soliman, S.M., Salem, H.B., Desoky, E.M., Babalghith, A.O., El-Tahan, A.M., Ibrahim, O.M., Ebrahim, M., El-Mageed, T.A., Elrys, A.R., Elbadawi, A.A., El-Tarabily, K.A., Abu Qamar, S.F. 2022. Role of nanoparticles in enhancing crop tolerance to abiotic stress: a comprehensive review. *Front. Plant. Sci.* 13: 946717. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.946717>
- Etesami, H., Jeong, B. R. 2018. Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology and environmental safety*, 147, 881-896. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.063>
- Etesami, H. 2018. Can interaction between silicon and plant growth promoting rhizobacteria benefit in alleviating abiotic and biotic stresses in crop plants?. *Agriculture, ecosystems & environment*, 253, 98-112. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.007>
- Ghanem, H. E., Aldesuquy, H. S., Elshafii, H. A. 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 Lemraski, M., Normohamadi, G., Madani, H., Heidari Sharifabad, H., Mobasser, H. R. 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. *New Finding in Agriculture*, 9(1 (Autumn 2014)), 47-66.
- Glick, B. R. 2014. Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed jingerthe world. *Microbiological research*, 169(1), 30-39. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.09.009>
- Gonzalo, M. J., Lucena, J. J., & Hernández-Apaolaza, L. 2013. Effect of silicon addition on soybean (*Glycine max*) and cucumber (*Cucumis sativus*) plants grown under iron deficiency. *Plant physiology and biochemistry*, 70, 455-461. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.06.007>
- Hadebe, S. T., Modi, A. T., Mabhaudhi, T. 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(3), 177-191. <https://doi.org/10.1111/jac.12191>
- Hattori, T., Inanaga, S., Araki, H., An, P., Morita, S., Luxová, M., Lux, A. 2005. Application of silicon enhanced drought tolerance in Sorghum bicolor. *Physiologia Plantarum*, 123(4), 459-466. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2005.00481.x>
- Jahanzad, E., Jorat, M., Moghadam, H., Sadeghpour, A., Chaichi, M. R., Dashtaki, M. 2013. Response of a new and a commonly grown forage sorghum cultivar to limited irrigation and planting density. *Agricultural Water Management*, 117, 62-69. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.001>
- Jeelani, P. G., Mulay, P., Venkat, R., Ramalingam, C. 2020. Multifaceted application of silica nanoparticles. A review. *Silicon*, 12, 1337-1354. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00229-y>
- Jinger, D., Dhar, S., Vijayakumar, S., Pande, V. C., Kakade, V., Jat, R. A., Dinesh, D. 2020. Silicon nutrition of graminaceous crops. *Indian Farming*, 70(10), 18-21.
- Kalteh, M., Alipour, Z. T., Ashraf, S., Marashi Aliabadi, M., Falah Nosratabadi, A. 2018. Effect of silica nanoparticles on basil (*Ocimum basilicum*) under salinity stress. *Journal of Chemical Health Risks*, 4(3), 49-55. DOI: [10.22034/jchr.2018.544075](https://doi.org/10.22034/jchr.2018.544075)
- Kalia, A., Sharma, S. P., Kaur, H. (2019). Nanoscale fertilizers: harnessing boons for enhanced nutrient use efficiency and crop productivity. *Nanobiotechnology Applications in Plant Protection: Volume 2*, 191-208.
- Kopittke, P. M., Gianoncelli, A., Kourousias, G., Green, K., McKenna, B. A. 2017. Alleviation of Al toxicity by Si is associated with the formation of Al-Si complexes in root tissues of sorghum. *Frontiers in plant science*, 8, 2189.
- Kovács, S., Kutasy, E., Csajbók, J. 2022. The multiple role of silicon nutrition in alleviating environmental stresses in sustainable crop production. *Plants*, 11(9), 11-22. <https://doi.org/10.3390/plants11091223>
- Kumar, M., Sabbarwal, S., Mishra, P. K., Upadhyay, S. N. 2019. Thermal degradation kinetics of sugarcane leaves (*Saccharum officinarum* L) using thermo-gravimetric and differential scanning calorimetric studies. *Bioresource technology*, 279, 262-270. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.137>

- Liang, Y., Si, J., Römheld, V. 2005. Silicon uptake and transport is an active process in *Cucumis sativus*. *New phytologist*, 167(3), 797-804. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01463.x>
- Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y. G., Christie, P. 2007. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. *Environmental pollution*, 147(2), 422-428. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008>
- Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H., & Song, A. 2015. Silicon in agriculture. *LIANG, Y. et al. Silicon-mediated tolerance to salt stress. Springer Science*, 123-142.
- Lim, J. S., Manan, Z. A., Alwi, S. R. W., & Hashim, H. 2012. A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(5), 3084-3094. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.051>
- Liu, L., Tan, Z., Zhang, L., Huang, Q. 2018. Influence of pyrolysis conditions on nitrogen speciation in a biochar 'preparation-application' process. *Journal of the Energy Institute*, 91(6), 916-926. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.09.004>
- Liu, X., Li, L., Bian, R., Chen, D., Qu, J., Wanjiru Kibue, G., Pan, G., Zhang, X., Zheng, J. 2014. Effect of biochar amendment on soil-silicon availability and rice uptake. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(1), 91-96. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200582>
- Mahmoud, L. M., Shalan, A. M., El-Boray, M. S., Vincent, C. I., El-Kady, M. E., Grosser, J. W., Dutt, M. (2022). Application of silicon nanoparticles enhances oxidative stress tolerance in salt stressed 'Valencia' sweet orange plants. *Scientia Horticulturae*, 295, 110856. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110856>
- Meena, V. D., Dotaniya, M. L., Coumar, V., Rajendiran, S., Ajay, Kundu, S., Subba Rao, A. 2014. A case for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 84, 505-518.
- Mitani, N., Ma, J. F. 2005. Uptake system of silicon in different plant species. *Journal of experimental botany*, 56(414), 1255-1261. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri121>
- Nabati, J., Kafi, M., Masoumi, A., Mehrjerdi, M. Z. 2013. Effect of salinity and silicon application on photosynthetic characteristics of sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *International Journal of Agricultural Sciences*, 3(4), 483-492.
- Niyazi, B. A. 2018. Forage production and water use efficiency (WUE) of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) under drought stress as affected by silicon (Si) treatments. *Int J Eng Res Tech*, 7, 32-38.
- Oliveira, K. S., de Mello Prado, R., de Farias Guedes, V. H. 2020. Leaf spraying of manganese with silicon addition is agronomically viable for corn and sorghum plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 872-880. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00173-6>
- Parr, J. F., Sullivan, L. A. 2005. Soil carbon sequestration in phytoliths. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(1), 117-124. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.06.013>
- Parveen, A., Mumtaz, S., Saleem, M. H., Hussain, I., Perveen, S., Thind, S. 2022. Silicon and nanosilicon mediated heat stress tolerance in plants. In *Silicon and Nano-Silicon in Environmental Stress Management and Crop Quality Improvement* (pp. 153-159). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91225-9.00001-7>

- 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
- Periakaruppan, R., N, R. D., Abed, S. A., Vanathi, P., Kumar, J. S. 2023. Production of biogenic silica nanoparticles by green chemistry approach and assessment of their physicochemical properties and effects on the germination of sorghum bicolor. *Silicon*, 1-8. <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02348-z>
- Qian, L., Chen, B., Chen, M. 2016. Novel alleviation mechanisms of aluminum phytotoxicity via released biosilicon from rice straw-derived biochars. *Scientific reports*, 6(1), 29346.
- Rastogi, A., Tripathi, D. K., Yadav, S., Chauhan, D. K., Živčák, M., Ghorbanpour, M., El-Sheery, N.I., Brestic, M. 2019. Application of silicon nanoparticles in agriculture. 3 *Biotech*, 9, 1-11.
- Raimondi, G., Maucieri, C., Toffanin, A., Renella, G., Borin, M. 2021. Smart fertilizers: What should we mean and where should we go?. *Italian Journal of Agronomy*, 16(2).
- Rajendiran, S., Coumar, M. V., Kundu, S., Dotaniya, A. M., Rao, A. S. 2012. Role of phytolith occluded carbon of crop plants for enhancing soil carbon sequestration in agroecosystems. *Current Science*, 911-920. <https://www.jstor.org/stable/24088879>
- Rajput, V. D., Minkina, T., Feizi, M., Kumari, A., Khan, M., Mandzhieva, S., Sushkova, S., El-Ramady H., Verma, K.K., Singh, A., Hullebusch, E.D., Singh, R.K., Jatav, H.S., Choudhary, R. 2021. Effects of silicon and silicon-based nanoparticles on rhizosphere microbiome, plant stress and growth. *Biology*, 10(8), 791. <https://doi.org/10.3390/biology10080791>
- Resende, R.S., Rodrigues, F.A., Cavatte, P.C., Martins, S.C.V., Moreira, W.R., Chaves, A.R.M., DaMatta, F.M. 2012. *Phytopathology* 102 (9): 892-898. <http://dx.doi.org/10.1094/PHYTO-01-12-0014-R>
- Resende, R. S., Rodrigues, F. A., Gomes, R. J., Nascimento, K. J. T. 2013. Microscopic and biochemical aspects of sorghum resistance to anthracnose mediated by silicon. *Annals of applied biology*, 163(1), 114-123. <https://doi.org/10.1111/aab.12040>
- Reynolds, O. L., Padula, M. P., Zeng, R., Gurr, G. M. 2016. Silicon: potential to promote direct and indirect effects on plant defense against arthropod pests in agriculture. *Frontiers in plant science*, 7, 744. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00744>
- Rizal, G., Karki, S., Alcasid, M., Montecillo, F., Acebron, K., Larazo, N., Garcia, R., Slamet-Loedin, I.H., Quick, W. P. 2014. Shortening the breeding cycle of sorghum, a model crop for research. *Crop Science*, 54(2), 520-529. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.07.0471>
- Sakr, N. 2016. Silicon control of bacterial and viral diseases in plants. *Journal of plant protection research*, 56, 331 – 336.
- Sakr, N. 2017. The role of silicon (Si) in increasing plant resistance against insect pests review article. *Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica*, 52(2), 185-204. DOI: <https://doi.org/10.1556/038.52.2017.020>
- Sarkar, S., Datta, S. C., Biswas, D. R. 2014. Synthesis and characterization of nanoclay-polymer composites from soil clay with respect to their water-holding capacities and nutrient-release behavior. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(6). <https://doi.org/10.1002/app.39951>

- Scrinis, G., Lyons, K. 2007. The emerging nano-corporate paradigm: nanotechnology and the transformation of nature, food and agri-food systems. *The International Journal of Sociology of Agriculture and Food*, 15(2), 22-44. <https://doi.org/10.48416/ijsaf.v15i2.293>
- Shedeed, S. I. 2018. Assessing effect of potassium silicate consecutive application on forage maize plants (*Zea mays* L.). *Journal of Innovations in Pharmaceutical and Biological Sciences*, 5(2), 119-127.
- Sonobe, K., Hattori, T., An, P., Tsuji, W., Eneji, A. E., Kobayashi, S., Kawamura, Y., Tanaka, K., Inanaga, S. (2010). Effect of silicon application on sorghum root responses to water stress. *Journal of Plant Nutrition*, 34(1), 71-82. <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.531360>
- Sukartono., Suwardji., 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(2), 1-11.
- Suriyaprabha, R., Karunakaran, G., Yuvakkumar, R., Prabu, P., Rajendran, V., Kannan, N. 2012. Growth and physiological responses of maize (*Zea mays* L.) to porous silica nanoparticles in soil. *Journal of Nanoparticle Research*, 14, 1-14.
- Teixeira, G. C. M., de Mello Prado, R., Oliveira, K. S., D'Amico-Damião, 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*, 20, 1311-1320. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00214-0>
- Tripathi, D. K., Mishra, S., Chauhan, D. K., Tiwari, S. P., Kumar, C. 2013. Typological and frequency based study of opaline silica (phytolith) deposition in two common Indian Sorghum L. species. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 83, 97-104.
- Wang, Y., Xiao, X., Chen, B. 2018. Biochar impacts on soil silicon dissolution kinetics and their interaction mechanisms. *Scientific Reports*, 8(1), 8040.
- Yin, L., Wang, S., Li, J., Tanaka, K., Oka, M. 2013. Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of Sorghum bicolor. *Acta physiologiae plantarum*, 35, 3099-3107.
- Yin, L., Wang, S., Tanaka, K., Fujihara, S., Itai, A., Den, X., Zhang, S. 2016. Silicon-mediated changes in polyamines participate in silicon-induced salt tolerance in *Sorghum bicolor* L. *Plant, cell & environment*, 39(2), 245-258.
- Zarooshan, M., Abdolzadeh, A., Sadeghipour, H. R., Mehrabanjoubani, P. 2022. Effect of silicon and nano silicon application on wheat (C3) and sorghum (C4) under salinity stress. *Journal of Plant Production Research*, 29(1), 173-190. DOI: [10.22069/JOPP.2022.18995.2802](https://doi.org/10.22069/JOPP.2022.18995.2802)
- Wang, Y., Xiao, X., Chen, B. 2018. Biochar impacts on soil silicon dissolution kinetics and their interaction mechanisms. *Scientific Reports*, 8(1), 8040.