

## Ameliorasi Berbasis Unsur Hara Silika di Lahan Rawa

### *Silicon-Based Amelioration in Swampland*

Adha Fatmah Siregar<sup>1)\*</sup>, Wahida Annisa Yusuf<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Balai Penelitian Tanah, Jl. Tentara Pelajar No. 12A, Cimanggu Bogor, 16124

<sup>2)</sup> Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa, Jl. Kebun Karet, Lok Tabat Kotak Pos 31, Banjarbaru 70712

\*E-mail: adha\_siregar@yahoo.com

Diterima 2 Mei 2020, Direview 6 Mei 2020, Disetujui dimuat 18 Juni 2020, Direview oleh Masganti dan Wawan

**Abstrak.** Unsur hara Silika (Si) memiliki peranan penting pada pertumbuhan dan produktivitas tanaman padi. Tanaman padi menyerap Si dalam jumlah yang besar yaitu sekitar 10 kali N, 20 kali P, 6 kali K dan 30 kali Ca. Budidaya padi di lahan rawa memiliki beberapa faktor pembatas yang mempengaruhi pertumbuhan dan produktivitas padi diantaranya keracunan unsur toksik seperti Fe dan Al. Kadar unsur toksik terutama Fe di lahan rawa menyebabkan tanah menjadi masam, sehingga banyak tanaman yang tidak dapat beradaptasi dengan kondisi tersebut. Kondisi ini dapat diatasi diantaranya dengan aplikasi Si, yang berperan menurunkan serapan Fe dan Al yang berada dalam kondisi toksik. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa Si berpengaruh dalam menurunkan tingkat toksisitas Al dan Fe di tanah. Aplikasi Si sebagai amelioran mengurangi kandungan Fe pada permukaan akar padi serta menurunkan serapan Fe pada tanaman padi sawah melalui peningkatan kekuatan oksidasi akar. Lebih lanjut, aplikasi Si pada budidaya tanaman padi dapat meningkatkan hasil gabah sebesar 50,8%.

*Kata kunci: Ameliorasi / lahan rawa / padi / silikon / unsur toksik*

**Abstract.** Silicon (Si) has an important role on rice crops growth and productivity. Rice crops absorbs enormous amount of Si as much as ten times of N, twenty times of P, six times of K and thirty times of Ca. Rice cultivation in swampland has several limiting factors such as Fe and Al toxicity. Fe toxicity could increase soil acidity in swampland. However, most plants could not adapt to this condition. Si application as soil ameliorant could be an option to overcome this problem. Si could reduce the toxicity level of Fe and Mn in soil. Previous research proved that Si could decrease Fe and Al toxicity. Si application as ameliorant could reduce Fe concentration in root zone which lead to decreasing Fe uptake through increasing oxidation capability of the root. Moreover, Si application could increase rice yield up to 50.8%.

*Key words: Amelioration / swampland / rice / silicon / toxic element*

### PENDAHULUAN

**D**i lahan rawa pasang surut toksisitas  $Fe^{2+}$  adalah salah satu penyakit fisiologis utama yang membatasi pertumbuhan padi. Kemasaman merupakan penciri utama dari tanah di lahan rawa pasang surut. Reaksi tanahnya tergolong masam sampai luar biasa masam yang berkisar pada pH 4 (*Sulfaquents*) dan pH <3,5 (*Sulfaquepts*), hanya sedikit tanaman yang dapat beradaptasi dengan kondisi kemasaman yang tinggi (Kochian *et al.* 2004). Pada kondisi normal, tanah di lahan rawa pasang surut tidak dapat dimanfaatkan secara produktif untuk pertanian karena pH rendah (asam), sehingga banyak tanaman yang tidak toleran. Padi merupakan tanaman yang memiliki toleransi tinggi terhadap kemasaman, namun batas toleransi pH untuk tanaman padi belum

menyelesaikan seluruh masalah, karena ketika pH turun mencapai (pH <4) dan kondisi tergenang mengakibatkan meningkatnya konsentrasi unsur toksik seperti: Al, Mn, dan besi serta sulfat (Shamshuddin *et al.* 2013).

Pada kondisi tergenang, keracunan Fe lebih sering terjadi dibandingkan keracunan Al (Dobermann dan Fairhurst 2000). Hal ini disebabkan pada keadaan tergenang  $Al^{3+}$  mempunyai hubungan erat dengan proses reduksi  $Fe^{3+}$ . Proses reduksi melepaskan  $OH^-$  yang bereaksi dengan Al terlarut menjadi Al hidroksida yang sukar larut, sehingga tanah sawah jarang mengalami keracunan Al kecuali bila proses reduksi berlangsung lambat. Toksisitas Fe menjadi salah satu faktor penghambat untuk produksi padi sawah di lahan rawa karena pembentukan  $Fe^{2+}$  berlebih pada tanah dengan kondisi tereduksi. Pada tahap vegetatif, efek

keracunan Fe pada tanaman padi dikaitkan dengan penurunan tingkat asimilasi CO<sub>2</sub> bersih (A) karena keterbatasan stomatal dan non-stomatal fotosintesis (Pereira *et al.* 2013). Tingkat kritis toksisitas Fe dalam jaringan tanaman bervariasi dari 300-500 mg.kg<sup>-1</sup> Fe (Dobermann dan Fairhurst 2000). Kelebihan Fe dapat menyebabkan gejala keracunan dan kahat hara P, K, Ca, Mg, Mn sebagai pengaruh tidak langsung, seperti yang sering ditemukan pada tanaman padi selama fase vegetatif dan reproduksi, sehingga menurunkan hasil panen (Müller *et al.* 2015; Audebert dan Fofana 2009).

Upaya mengatasi kendala kesuburan tanah di lahan rawa adalah dengan menambahkan amelioran seperti biochar maupun unsur Si (Annisa dan Nursyamsi 2016; Mustafa *et al.* 2017). Di Asia biochar telah digunakan untuk pengelolaan pertanian beberapa ribu tahun yang lalu. Biochar dibuat dengan pirolisis bahan baik residu kayu maupun sisa tanaman, yang menghasilkan produk stabil dengan kandungan karbon tinggi. Kapasitas menahan air dan pH tergantung pada jenis bahan baku dan proses produksi, tetapi biochar berkontribusi terhadap kesuburan tanah dan peningkatan hasil (Lehmann *et al.* 2011; Manickam *et al.* 2015). Sedangkan silika memiliki potensi mereduksi kelarutan logam berat pada tanah di lahan rawa. Pemanfaatan silika dari sekam padi sebagai adsorben dan selektif untuk mengadsorpsi ion-ion logam sudah banyak dilakukan (Mustafa *et al.* 2017). Pemberian unsur Si pada tanah meningkatkan toleransi tanaman padi terhadap berbagai cekaman biotik (Debona *et al.* 2017); (Perez *et al.* 2014) dan cekaman abiotik seperti logam beracun (Abbas *et al.* 2015; Coskun *et al.* 2019; Sanglard *et al.* 2016; Song *et al.* 2014). Unsur Si dapat mengurangi efek keracunan pada tanaman padi melalui penurunan konsentrasi Fe di jaringan daun dan akar serta peningkatan aktivitas sistem antioksidan (Chalmardi *et al.* 2014; Dufey *et al.* 2014).

Pada lahan-lahan marginal seperti lahan rawa pasang surut, tanaman padi perlu memiliki kandungan silikat yang cukup agar tanaman terlindung dari serangan hama dan penyakit, serta pertumbuhan tanaman yang tegar. Padahal pada tanah-tanah tersebut, kandungan silikatnya termasuk rendah. Silika tidak termasuk ke dalam unsur hara esensial bagi tanaman (Hayasaka *et al.* 2005), tetapi silika memberikan efek menguntungkan bagi banyak tanaman (Ashtiani *et al.* 2012). Mengintensifkan Kembali penggunaan pupuk silikat dalam budidaya padi saat ini khususnya di lahan rawa pasang surut

sangat tepat, seiring dengan kandungan Fe yang tinggi di lahan dan kebijakan pemerintah untuk meningkatkan produksi padi nasional sebesar 7%/tahun dengan lahan marginal seperti lahan rawa. Makalah ini disusun bertujuan untuk menjelaskan tentang peran silika sebagai bahan amelioran yang dapat mengurangi keracunan besi pada tanaman padi di lahan rawa selama fase pertumbuhan dan reproduksi.

## KEBERADAAN SILIKA DI TANAH

Silika (Si) merupakan komponen terbesar kedua penyusun kerak bumi sebesar 27,7%, sedangkan komponen terbesar pertama adalah oksigen sebesar 47%. Selain itu Si juga terdapat di sebagian besar bahan induk penyusun tanah (Sommer *et al.* 2006). Konsentrasi Si bervariasi antara 1 hingga 45 % wt. Pada tanah tekstur liat kandungan Si berkisar antara 200-300 g Si kg<sup>-1</sup> serta pada tanah bertekstur pasir mencapai 450 g Si kg<sup>-1</sup> (Sommer *et al.* 2006; Matichenkov dan Calvert 2002). Tanah yang kandungan Si rendah merupakan tanah-tanah yang telah terlapuk secara intensif di daerah beriklim basah/curah hujan tinggi. Ciri-ciri tanah yang mengandung Si rendah adalah : (1) Kandungan Al-dd tinggi; (2) kejenuhan basa rendah; (3) pH rendah; (4) kapasitas fiksasi P tinggi, disebabkan oleh tingginya Kapasitas Tukar Anion (KTA) dan tingginya kandungan Aluminium dan Fe-oksida; serta (5) Mn<sup>2+</sup> dan Fe<sup>2+</sup> tersedia bagi tanaman tinggi. Si menjadi konstituen anorganik utama pada tanaman yang lebih tinggi, dan sejumlah besar bukti menunjukkan nilai Si dalam meningkatkan produktivitas tanaman (Kim *et al.* 2011; Ahmed *et al.* 2011). Pupuk Si saat ini sudah mulai banyak diaplikasikan pada sistem produksi tanaman di seluruh dunia. Tingginya variasi tingkat pelapukan mineral penyusun tanah sangat berpengaruh terhadap besarnya jumlah Si tersedia yang dilepaskan dalam bentuk asam monosilikat. Pada tanah-tanah yang telah mengalami pelapukan tingkat lanjut, seperti Ultisols, Oxisols dan Latosol, memiliki kandungan Si tersedia yang rendah yang umumnya berada dalam bentuk aluminium silikat dan kuarsa (Foy 1992; Liang *et al.* 2015).

Meskipun jumlah Si sangat berlimpah namun berada dalam bentuk tidak larut atau *inert* sehingga ketersediaannya di dalam tanah secara umum tergolong rendah. Tanaman umumnya menyerap Si dalam bentuk asam orthosilikat yang tidak bermuatan (Meharg dan Meharg 2015). Untuk mengubah Si menjadi bentuk

tersedia yang dapat diserap tanaman maka diperlukan proses reaksi secara kimia maupun biologis. Pada kondisi tersedia, Si yang terdapat pada larutan tanah umumnya langsung diserap oleh tanaman yang ketersediaannya dipengaruhi oleh jenis mineral serta reaksi adsorpsi di dalam tanah (Sposito 2008; Hiradate 2012). Lebih lanjut, hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat korelasi negatif yang nyata antara Si tersedia dan Si total dalam tanah (Yanai *et al.* 2016). Hal ini menguatkan penelitian sebelumnya bahwa tingginya konsentrasi Si tanah bukanlah faktor penentu utama tingginya Si tersedia di dalam tanah.

Tanah sulfat masam yang mengalami kondisi pasang surut berselang dicirikan dengan kemasaman tanah yang tinggi (pH tanah dibawah 3,5) akibat dari tingginya kandungan pirit dan aluminium. Konsentrasi Al yang tinggi pada tanah sulfat masam dapat mengakibatkan keracunan bagi tanaman. Hasil penelitian (Elisa *et al.* 2016; Miranda 2012) menyatakan bahwa Si mampu mengurangi tingkat keracunan Al. Mekanisme yang dapat menjelaskan peranan Si dalam menurunkan tingkat keracunan Al yaitu hadirnya asam monosilik yang akan mengikat Al hidroksida. Elisa *et al.* (2016) melaporkan bahwa anion silika juga memiliki kemampuan menetralkan ion  $H^+$  di dalam larutan tanah, dimana anion silika dan ion  $H^+$  akan membentuk asam monosilik ( $H_4SiO_4$ ). Unsur Si memiliki dua bentuk utama yaitu dalam bentuk asam monosilik ( $H_4SiO_4$ ) yang terdapat dalam larutan tanah dengan konsentrasi dalam larutan tanah berkisar 0,1 hingga 0,6 Mm (Sommer *et al.* 2006) dan dalam bentuk silika amorf hidrat ( $SiO_2 \cdot nH_2O$ ). Jumlah Si yang tersedia dipengaruhi oleh kelarutannya, sedangkan laju kelarutan Si bergantung pada tingkat kemasaman tanah (pH) dan redoks potensial (Eh) (Patra dan Neue 2010). Tanah sulfat masam yang mengalami kondisi aerob dan anaerob silih berganti mengakibatkan fluktuasi nilai pH dan Eh yang berpengaruh terhadap ketersediaan Si tanah.

### Peran Silika pada Tanaman Padi

Pesatnya alih fungsi lahan khususnya lahan pertanian berdampak terhadap terjadinya aktivitas pertanian yang intensif dan menguras ketersediaan hara tanah. Kegiatan pertanian yang intensif tanpa diikuti dengan pengelolaan hara yang tepat akan berdampak terhadap penurunan hasil tanaman. Berkurangnya ketersediaan hara tanah tidak hanya terjadi pada hara *esensial* tetapi juga hara *benefisial* seperti Si terutama jika

tidak ada pemberian tambahan Si ke tanah, baik dengan cara pengembalian jerami ataupun penambahan sumber Si lainnya (Miyake 1993). Batas kritis Si tersedia untuk mendukung pertumbuhan padi adalah sebesar  $300 \text{ mg SiO}_2 \text{ kg}^{-1}$  (Sumida 1992), sedangkan Matichenkov dan Calvert (2002) menyatakan bahwa Si tersedia dibawah  $300 \text{ mg SiO}_2 \text{ kg}^{-1}$  termasuk kategori defisiensi dan di bawah  $600 \text{ mg SiO}_2 \text{ kg}^{-1}$  termasuk rendah.

Kegiatan pertanian cukup intensif terutama pada budidaya padi, dikarenakan tingginya kebutuhan beras nasional untuk pangan di Indonesia. Guna memenuhi kebutuhan tersebut maka pengelolaan hara sangat penting, tidak hanya untuk pengelolaan hara esensial tetapi juga kebutuhan akan hara *benefisial* seperti Si sudah harus diikutsertakan juga. Tanaman padi termasuk tanaman akumulator Si bersama dengan gandum, millet serta tebu yang membutuhkan Si dalam jumlah besar (Ma dan Yamaji 2006) dan padi menyerap Si hingga  $500 \text{ kg ha}^{-1}$  per tahunnya (Makabe *et al.* 2009). Akar tanaman menyerap Si dalam bentuk  $H_4SiO_4$  dan akan terakumulasi pada daun dan jaringan tanaman primer lainnya dalam bentuk silika amorf atau *phytolith opal*, silika amorf ini akan bersifat *immobile* dalam jaringan tanaman (Epstein 1994). Lebih lanjut, Meena *et al.* (2014) menyatakan bahwa jumlah Si yang terakumulasi pada jerami padi sebesar 4-20% Si dan tersebar di seluruh organ tanaman. Pada daun padi sekitar 90% asam silikat berada dalam bentuk silika gel atau asam polysilikat. Kandungan Si pada tanaman padi akan meningkat seiring dengan bertambahnya umur tanaman (Nayar *et al.* 1982).

Si diketahui dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman biotik dan abiotik (Tabel 1). Pada tanaman padi salah satu cekaman biotik yang berdampak terhadap penurunan hasil diantaranya serangan penyakit blas baik blas daun maupun leher yang disebabkan oleh fungi *Magnaporthe grisea* M.E. Barr. Aplikasi Si telah terbukti mampu menurunkan dan mengontrol serangan penyakit blas secara efektif. (Siregar *et al.* 2016) melaporkan bahwa aplikasi Si pada tanah dengan kandungan Si tersedia  $426 \text{ mg SiO}_2 \text{ kg}^{-1}$  menunjukkan hasil yang nyata dalam menurunkan serangan blas daun dan leher. Lebih lanjut diketahui bahwa tingkat serangan blas berkorelasi nyata dengan rendahnya kadar Si tersedia di tanah (Kim *et al.* 2002; Ranganathan *et al.* 2006). Meningkatnya ketahanan tanaman padi terhadap serangan blas dikarenakan Si yang terdapat di jaringan epidermal akan membentuk membran silika-selulosa dan akan berasosiasi bersama

pektin dan ion Ca. Lapisan ini membentuk lapisan kutikula berlapis yang melindungi, menguatkan struktur jaringan tanaman serta menghambat penetrasi fungi *Magnaporthe grisea* (Hayasaka *et al.* 2005). Selain meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman biotik, Si juga mampu meningkatkan ketahanan terhadap serangan abiotik seperti rebah (*lodging*), kekeringan, radiasi, temperatur tinggi, cekaman salinitas, keracunan unsur logam serta ketidakseimbangan unsur hara lainnya (Ahmed *et al.* 2011; Miranda 2012; Mobasser *et al.* 2009). Si yang terdapat di jaringan tanaman akan mampu meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman kekeringan dengan menjaga keseimbangan air di jaringan tanaman dan menekan laju transpirasi (Ming *et al.* 2012), sehingga kehilangan air dapat ditekan dan menjaga agar proses fotosintesis berlangsung lebih efisien (Hattori *et al.* 2005). Lebih lanjut (Emam *et al.* 2014) menyatakan bahwa pemberian Si pada kondisi cekaman kekeringan dapat meningkatkan kualitas biji dan jerami padi seiring dengan meningkatnya kandungan amilosa, *phenolic* dan *flavonoid*. Cekaman abiotik lainnya yang banyak terjadi pada budidaya padi yaitu terjadinya rebah yang dapat berdampak terhadap penurunan hasil. Kandungan Si pada jaringan batang padi akan menambah ketebalan dinding sel dan memperbesar ukuran jaringan vaskuler sehingga batang tanaman menjadi lebih kuat dan ketahanan terhadap rebah meningkat (Korndörfer *et al.* 2004).

Aplikasi Si telah terbukti dapat meningkatkan ketebalan sel epidermis sehingga ketahanan tanaman padi terhadap rebah akan meningkat (Dorairaj *et al.* 2017). Hasil penelitian (Lavinsky *et al.* 2016) menambahkan bahwa pemberian Si mampu meningkatkan jumlah biji per panikel serta berat 1.000 butir. Selanjutnya Jawahar *et al.* (2015) menyatakan bahwa dengan penambahan Si mampu meningkatkan laju asimilasi karbohidrat di panikel sehingga akan meningkatkan proses pengisian bulir.

Terkait budidaya padi di tanah sulfat masam, terdapat beberapa faktor pembatas yang mempengaruhi pertumbuhan dan produktivitas padi diantaranya adalah keracunan unsur toksik. Kondisi ini dapat diatasi diantaranya dengan aplikasi Si. Hasil penelitian (Cocker *et al.* 1998) menunjukkan bahwa Si berpengaruh dalam menurunkan tingkat toksisitas Al. Dengan kehadiran Si di larutan tanah akan membentuk ikatan kompleks Al-Si yang tidak beracun (Ma 2004). Lebih lanjut (Meena *et al.* 2014) menyatakan bahwa dengan meningkatnya kandungan Si pada bagian akar tanaman akan mengurangi luasan tapak jerapan logam beracun seperti Al dan garam-garam lainnya pada akar sehingga mengurangi laju serapan dan translokasi unsur tersebut dari akar ke batang. Hasil penelitian (dos Santos *et al.* 2020) menunjukkan bahwa keberadaan besi mempengaruhi pertumbuhan tanaman serta indeks

Tabel 1. Peranan Si pada beberapa cekaman biotik dan abiotik

Table 1. Role of Si under biotic and abiotic stresses

Cekaman	Tanaman	Keterangan
<b>Penyakit</b>		
Blas daun dan leher	Padi	Patogen : <i>Pyricularia oryzae</i>
Bercak coklat	Padi	Patogen : <i>Bipolaris oryzae</i>
Hawar pelepah	Padi	Patogen : <i>Rhizoctonia solani</i>
<i>Grain discoloration</i>	Padi	Patogen : <i>Bipolaris fusarium</i>
Noda karat	Tebu	Patogen : <i>Puccinia melanocephala</i>
Noda cincin	Tebu	Patogen : <i>Leptosphaeria Sacchari</i> <i>Phyllosticta sp.</i> (anamorph)
Embun tepung	Gandum	Patogen : <i>Erysiphe graminis, Oidium monilioides</i>
<b>Hama</b>		
Penggerek batang	Padi	<i>Chilo suppressalis</i>
Wereng batang coklat	Padi	<i>Nilaparvata lugens</i>
Penggerek	Jagung	<i>Sesamia calamistis</i>
Penggerek batang	Tebu	<i>Diatraea saccharina</i>
<b>Cekaman Abiotik</b>		
Rebah	Semua tanaman	
Kekeringan	Semua tanaman	
Salinitas	Padi	
Al toksisitas	Padi	
Fe toksisitas	Padi	

Sumber: Meena *et al.* (2014)

panen padi, namun dengan kehadiran Si dalam tanah dapat menurunkan toksisitas besi (Tabel 2). Efek keracunan besi adalah kahat hara sehingga mempengaruhi terhadap serapan hara Ca, Mg, S, Cu, dan Mn di daun padi (Sahrawat 2004; Stein *et al.* 2009; Stein *et al.* 2014).

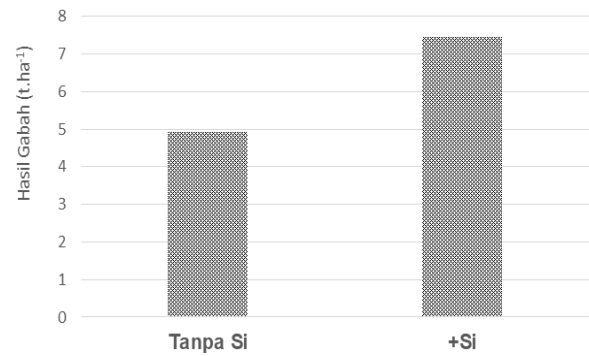
Tabel 2. Pengaruh silikon dan besi terhadap komponen hasil tanaman padi

Table 2. Effect of silicon on rice yield component

Parameter	-Fe		+Fe	
	-Si	+Si	-Si	+Si
Tinggi (cm)	97 ± 1,9	98±0,7	93 ± 0,5	94 ± 0,5
Jumlah Daun	115 ± 5,0	118±7,0	74 ± 3,0	73 ± 2,0
Jumlah Anakan	34 ± 1,2	36 ± 0,9	24 ± 1,0	25 ± 0,8
Jumlah Malai	26,2 ± 0,2	26,4 ±0,4	22,0 ± 0,4	23,4 ± 0,5
Luas Daun (m <sup>2</sup> )	0,22 ± 0,01	0,21 ± 0,02	0,12 ± 0,01	0,12 ± 0,01
Berat 1.000 biji (g)	23,4 ± 0,7	26,3 ± 0,7	18,4 ± 1,0	21,7 ± 0,4
Indek Panen	0,28 ± 0,01	0,34 ± 0,01	0,24 ± 0,01	0,30 ± 0,01

Sumber: Meena *et al.* (2014)

Si tidak hanya berperan dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman juga berpengaruh dalam meningkatkan hasil padi baik padi sawah maupun padi gogo (Datta dan Shinde 1985). Dengan aplikasi Si akan memacu serapan unsur hara esensial lainnya dan akan berdampak terhadap peningkatan hasil. Lebih lanjut diketahui bahwa Si juga berperan penting dalam pembentukan dan kualitas butir dan sekam padi (Savant *et al.* 1996). Kegiatan budidaya padi secara intensif akan berdampak terhadap terkurasnya unsur hara tanah termasuk Si dan kondisi ini berujung pada terjadinya pelandaian produktivitas padi. Oleh karena itu, pemberian Si sangat disarankan guna meningkatkan pertumbuhan dan produksi tanaman. Aplikasi Si dapat mengurangi kandungan Fe pada permukaan akar padi (Fu *et al.* 2012) serta menurunkan serapan Fe pada tanaman padi sawah melalui peningkatan kekuatan oksidasi akar (Fageria 2014). Hasil penelitian (Amrullah *et al.* 2014) menunjukkan bahwa pemberian pupuk Si meningkatkan hasil gabah kering panen (GKP) sebesar 50,8% (Gambar 1).



Gambar 1. Pengaruh Si terhadap hasil gabah kering panen (Sumber: Amrullah *et al.* 2014).

Figure 1. Effect of Si on rice yield (Source: Amrullah *et al.* 2014)

## BIOGEOKIMIA SI DI LAHAN RAWA

Lahan rawa mengandung biogenik silika (BSi) atau silikia amorf di dalam tanah akibat proses sedimentasi. Proses terbentuknya rawa adalah merupakan hasil endapan marin yang terjadi dari masa Holosen setelah kenaikan permukaan laut. Penyebaran tanah rawa di dunia disebabkan perubahan tinggi muka air laut akibat mencairnya lapisan es, namun pada beberapa daerah pola penyebaran rawa ditentukan oleh sedimen yang spesifik dan sejarah geomorfologi (Savant *et al.* 1996). Pada periode Pleistosen peningkatan tinggi muka air diperkirakan sekitar 60 m di bawah permukaan air laut sekarang, dan berdampak pada terbentuknya endapan baru berupa daratan akibat terangkutnya hasil erosi.

Tanah di lahan rawa pasang surut menyimpan *biogenic silica* (silika amorf) dan sekitar 3% silika amorf diendapkan secara permanen oleh *Bacillarophyceae* (Van Cappellen 2003). Siklus biogeokimia Si di lahan rawa pasang surut dipengaruhi oleh banyak faktor karena karakter ekologis spesifik lokasi. Diawali dengan terjadinya pelapukan batuan beku yang menyebabkan pelepasan silikon dalam bentuk tanah liat, kemudian silikon akan terlarut melalui sungai ke laut dan terjadi interaksi sebagai silikon terlarut di laut. Mineral silikat yang terdiri dari silikon dan oksigen biasa disebut kuarsa. Kuarsa adalah kerangka silikat dengan rumus empiris SiO<sub>2</sub> (silika). Silika juga terjadi dalam bentuk terhidrasi (SiO<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O), umumnya disebut silika *amorf*. Bagian keras mengandung silika yang diendapkan oleh

plankton laut adalah jenis silika *amorf* yang disebut sebagai silika biogenik (BSi). BSi diproduksi oleh diatom, *silicoflagellata* dan juga radiolaria yang merupakan protozoa. Remineralisasi dari pelarutan BSi disebut sebagai silika terlarut (DSi). Diatom merupakan organisme uniseluler yang dinding selnya mengandung silika dan merupakan komponen utama komunitas fitoplankton. Diatom (*Bacilliarophyceae*) merupakan anggota fitoplankton yang dominan di laut, terutama laut terbuka dengan ukuran berkisar 0,01-1,00 mm. Diatom adalah nama lain dari kelas Bacillariophyceae (Meirinawati 2018). Partikulat silikon dan organisme mati kemudian tenggelam ke dasar laut dan akhirnya berubah menjadi batuan beku (Yilmaz 2000). Ekosistem terestrial berperan dalam penggunaan, penyimpanan dan daur ulang pada siklus biogeokimia silikon (Ragueneau *et al.* 2006).

Sumber utama silikon terlarut di laut adalah pelapukan kimia dari batuan terestrial yang akan melarutkan silikon dan dibawa oleh limpasan sungai masuk ke laut (Libes 2009). Senyawa silikon terlarut yang dominan di air laut adalah asam ortosilikat [ $H_4SiO_4(Aq)$  atau  $Si(OH)_4(Aq)$ ]. Sekitar lima persen disosiasi silikon terlarut berada dalam bentuk  $H_3SiO_4^- (Aq)$ . Silikon organik kompleks terlarut tidak terjadi secara alami. Struktur asam silikat menunjukkan geometri tetrahedral dengan atom silikon di pusat dan kelompok hidroksil menempati masing-masing dari empat sudut. Struktur ini mirip dengan mineral silikat tetrahedral. Silika bertahan di dasar laut dan terkubur dalam sedimen. Umumnya di daerah *temperate* dan khatulistiwa, massa sedimen mengandung lebih dari sepertiga silika biogenik (Libes 2009). Secara biologi *Bacilliarophyceae* atau yang sering disebut diatom mengambil silikat terlarut (DSi = asam orto-silikat) dan menyimpannya sebagai silika amorf (ASi), sering disebut sebagai *biogenic silica* (BSi), dalam dinding sel sel silikat diatomik (lapisan pelindung diatom *frustule*). Pengurangan silika dari tanah menjadi salah satu penyebab terjadinya eutrofikasi di daerah pesisir (Ittekkot *et al.* 2000).

Silikon memainkan peran penting dalam masalah eutrofikasi di ekosistem estuari dan pesisir. Peningkatan masukan nitrogen dan fosfor ke perairan dapat menyebabkan terjadinya eutrofikasi yang berdampak pada menurunnya jumlah silikat. Eutrofikasi menyebabkan peningkatan rasio nutrisi N : Si dan P : Si (Egge dan Aksnes 1992). Kekurangan Si bisa mengubah ekosistem dari diatom ke non diatom, yang biasa didominasi *flagellate* (Conley *et al.* 1993).

Penurunan rasio Si : N dan Si : P dapat menyebabkan pengurangan diatom dan peningkatan jumlah nondiatom dari komunitas fitoplankton. Ledakan nondiatom dapat mengandung spesies yang berbahaya seperti *Phaeocystis* sp., *Gonyulax* sp., dan *Chrysochromulina* sp. (Smayda 1997). Selain itu, ledakan nondiatom bisa menyebabkan kondisi anoksik dan peningkatan kekeruhan air (Struyf *et al.* 2009).

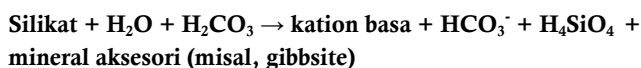
Silika dikenal sebagai *beneficial element* bagi tanaman padi yang merupakan tanaman kumulatif Si. Nilai penting Si berkaitan dengan peningkatan hasil padi, peningkatan ketahanan terhadap penyakit, dan ketahanan terhadap rebah (Ma *et al.* 2001). Menurut (Savant *et al.* 1996) Si dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stres, mengurangi toksisitas logam, dan meningkatkan aktivitas enzim. Tanaman mengambil DSi (silikat terlarut) dari larutan tanah, dan menyimpannya sebagai silika amorf (ASi), terutama dalam tubuh silika yang dikenal sebagai *phytolith* (Piperno 1988). *Phytoliths* lebih tahan terhadap dekomposisi dibandingkan dengan jaringan tanaman lainnya. Silikon dalam bentuk asam monosilikat diserap oleh akar dan di translokasikan melalui pembuluh *xylem* ke daun tanaman melalui proses transpirasi, sehingga silikon terkonsentrasi di jaringan epidermis. Tanaman tebu menyerap silikon terbesar antara 300-700 kg Si ha<sup>-1</sup>, kemudian padi sekitar 150-300 kg Si ha<sup>-1</sup> serta gandum sebesar 50-140 kg Si ha<sup>-1</sup> dan proses penyerapannya melalui proses penyerapan pasif (difusi dan aliran massa).

## MEKANISME SILIKA SEBAGAI BAHAN PENETRASI UNSUR TOKSIK

Pemanfaatan tanah dalam ekosistem rawa seringkali mengalami kendala akibat penurunan pH tanah oleh asam sulfat hasil oksidasi pirit (FeS) yang dapat meningkatkan kelarutan Al dan Fe, serta logam-logam yang terdapat dalam mineral tanah. Hal tersebut berakibat terjadinya toksisitas aluminium dan logam berat lainnya serta dampak lain akibat rendahnya pH tanah yaitu terganggunya ekofisiologi tanaman sehingga berpengaruh terhadap produktivitasnya. Keberadaan Si-tersedia pada daerah tropika yang hanya seperlima banyaknya jika dibandingkan dengan tanah yang berada di daerah subtropika menyebabkan ketersediannya rendah dalam tanah. Proses kehilangan Si melalui desilikasi banyak dijumpai pada tanah-tanah tua di daerah tropis dan subtropis yang menyebabkan

dominasi Al dan Fe di dalam tanah. Konsentrasi silikon amorf (ASi) yang tinggi dalam biomassa menciptakan kondisi ideal untuk rawa pasang surut sebagai penyangga (Struyf *et al.* 2009). Di lahan rawa pasang surut faktor genangan, lama genangan dan frekuensi genangan mempengaruhi siklus silikon amorf (ASi). Waktu tinggal air yang lama meningkatkan potensi retensi ASi, karena konsentrasi kesetimbangan akan tercapai dalam air tanah untuk silikon terlarut (DSi) yang mengakibatkan terhambatnya siklus silikon amorf (ASi) (Van Cappellen 2003). Proses penguapan yang tinggi akan semakin meningkatkan retensi, karena ini menjadi penyebab hilangnya air yang tidak diperkaya dengan silika.

Ada lima mekanisme utama peran silika sebagai bahan penetral melalui: (1) meningkatkan pH tanah dengan asam monosilikat, (2) menjerap Fe hidroksida dan mengurangi mobilitasnya dengan asam monosilikat, (3) membentuk substansi larut antara asam monosilikat dengan ion Fe, (4) menjerap Fe yang mobil di permukaan silika, dan (5) meningkatkan toleransi tanaman terhadap Fe dengan senyawa silika mobil. Anion silikat akan menetralkan  $H^+$  dalam larutan tanah. Anion silikat yang menjerap ion  $H^+$  ini selanjutnya membentuk asam monosilikat ( $H_4SiO_4$ ). Asam monosilikat akan membentuk kompleks dengan  $Fe^{3+}$  dalam larutan tanah selanjutnya terbentuk senyawa ferrosilikat hidroksil yang terpresipitasi pada zona akar. Anion dari asam monosilikat  $[SiOH_3]O^-$  dapat menggantikan anion fosfat  $[HPO_4]^{2-}$  yang berikatan dengan besi. Essington (2005) mengemukakan bahwa peningkatan silika dalam tanah terjadi akibat proses hidrolisis mineral silikat akibat interaksi dengan tanah yang ada di lahan rawa yaitu tanah sulfat masam. Reaksi tersebut terjadi sebagai berikut:



Pada reaksi tersebut, kation basa umumnya berupa:  $Mg^{2+}$  atau  $Ca^{2+}$ ,  $H_2CO_3$  sebagai sumber proton,  $HCO_3^-$  sebagai bikarbonat,  $H_4SiO_4$  sebagai asam silikat, dan gibbsite merupakan contoh representatif dari mineral aksesori. Elisa *et al.* (2016) menambahkan bahwa silika yang dilepaskan dari kalsium silikat kedalam larutan tanah dapat diserap tanaman dalam bentuk  $Si(OH)_4$ . Teknologi lain dalam remediasi lahan tercemar logam berat dan untuk mengurangi potensi kerusakan tanah akibat keberadaan unsur-unsur logam berat, serta cekaman tanaman akibat logam berat

menggunakan teknik immobilisasi dan enkapsulasi dengan perlakuan silika. Teknologi ini mulai dikenalkan oleh Camenzuli dan Damian pada tahun 2013. Analisis mereka menjelaskan bahwa perlakuan silika secara cepat bereaksi dengan kation logam multivalen seperti  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ , dan  $Pb^{2+}$ , untuk mengimobilisasi logam dan presipitasi mineral logam silikat tidak larut. Lebih lanjut perlakuan silika ini dapat digunakan untuk mencegah oksidasi pirit. Mekanisme Si sebagai penetral logam dengan mencegah konsentrasi logam ke tingkat toksik, besi dan mangan diimobilisasi di dalam akar sebelum diangkut ke tunas (Ma *et al.* 1989). Si memiliki kemampuan meningkatkan volume dari *aerenchyma* (ruang udara di akar dan pucuk) untuk membantu transportasi oksigen ke akar, serta mengoksidasi besi dan mangan menjadi bentuk yang kurang beracun.

## KESIMPULAN

Aplikasi hara silika memberikan pengaruh yang nyata dan positif pada pertumbuhan tanaman padi. Kekurangan silika pada tanaman padi menyebabkan tanaman menjadi lebih rentan terhadap serangan cekaman biotik dan abiotik yang berdampak pada penurunan hasil dan kualitas hasil gabah. Di lahan rawa, Si berperan sebagai penetral logam melalui mekanisme proses imobilisasi di dalam akar sebelum diangkut ke tunas. Selain itu Si juga memiliki kemampuan meningkatkan volume dari *aerenchyma* (ruang udara di akar dan pucuk) untuk membantu transportasi oksigen ke akar, serta mengoksidasi besi dan mangan menjadi bentuk yang kurang beracun. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian Si dapat meningkatkan gabah kering panen sebesar 50,8%.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abbas T, Balal RM, Shahid MA, Pervez MA, Ayyub CM, Aqueel MA, Javaid MM. 2015. Silicon-induced alleviation of NaCl toxicity in okra (*Abelmoschus esculentus*) is associated with enhanced photosynthesis, osmoprotectants and antioxidant metabolism. *Acta Physiologiae Plantarum*. 37: 5-15. <https://doi.org/10.1007/s11738-014-1768-5>.

- Ahmed M, Fayyaz-ul-Hassen, Khurshid Y. 2011. Does silicon and irrigation have impact on drought tolerance mechanism of sorghum? *Agricultural Water Management*. 98(12): 1808-1812. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.07.003>.
- Amrullah A, Sopandie D, Sugianta S, Junaedi A. 2014. Peningkatan produktivitas tanaman padi (*Oryza sativa* L.) melalui pemberian nano silika. *Jurnal Pangan*. 23(1): 17-32. <https://doi.org/10.33964/JP.V23I1.46>.
- Annisa W, Nursyamsi D. 2016. Pengaruh amelioran, pupuk dan sistem pengelolaan tanah sulfat masam terhadap hasil padi dan emisi metana. *Jurnal Tanah dan Iklim*. 40(2): 135-145.
- Ashtiani FA, Kadir J, Nasehi A, Rahaghi SRH, Sajili H. 2012. Effect of silicon on rice blast disease. *Pertanika J. Trop. Agric. Sci*. 35(S): 1-12.
- Audebert A, Fofana M. 2009. Rice yield gap due to iron toxicity in West Africa. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 195(1): 66-76. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2008.00339.x>.
- Chalmardi ZK, Abdolzadeh A, Sadeghipour HR. 2014. Silicon nutrition potentiates the antioxidant metabolism of rice plants under iron toxicity. *Acta Physiologiae Plantarum*. 36: 493-502. <https://doi.org/10.1007/s11738-013-1430-7>.
- Cocker KM, Evans DE, Hodson MJ. 1998. The amelioration of aluminium toxicity by silicon in higher plants: Solution chemistry or an in planta mechanism? *Physiologia Plantarum*. 104: 608-614. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1998.1040413.x>.
- Conley DJ, Schelske CL, Stoermer EF. 1993. Modification of the biogeochemical cycle of silica with eutrophication. *Marine Ecology Progress Series*. 101(1-2): 179-192. <https://doi.org/10.3354/meps101179>.
- Coskun D, Deshmukh R, Sonah H, Menzies JG, Reynolds O, Ma JF, Kronzucker HJ, Bélanger RR. 2019. The controversies of silicon's role in plant biology. *New Phytologist*. 221: 67-85. <https://doi.org/10.1111/nph.15343>.
- Debona D, Rodrigues FA, Datnoff LE. 2017. Silicon's role in abiotic and biotic plant stresses. *Annual Review of Phytopathology*. 55: 85-107. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035312>.
- Dobermann A, Fairhurst T. 2000. Rice: Nutrient Disorders & Nutrient Management. Handbook Series. 191 p.
- dos Santos MS, Sanglard LMVP, Barbosa ML, Namorato FA, de Melo DC, Franco WCG, Pérez-Molina JP, Martins SCV, DaMatta FM. 2020. Silicon nutrition mitigates the negative impacts of iron toxicity on rice photosynthesis and grain yield. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Vol 189 February 2020, 110008. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110008>.
- Dufey I, Gheysens S, Ingabire A, Lutts S, Bertin P. 2014. Silicon application in cultivated rices (*Oryza sativa* L and *Oryza glaberrima* Steud) alleviates iron toxicity symptoms through the reduction in iron concentration in the leaf tissue. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 200(2): 132-142. <https://doi.org/10.1111/jac.12046>.
- Egge JK, Aksnes DL. 1992. Silicate as regulating nutrient in phytoplankton competition. *Marine Ecology Progress Series*. 83: 281-289. <https://doi.org/10.3354/meps083281>.
- Elisa AA, Ninomiya S, Shamshuddin J, Roslan I. 2016. Alleviating aluminum toxicity in an acid sulfate soil from Peninsular Malaysia by calcium silicate application. *Solid Earth*. 7: 367-374. doi:10.5194/se-7-367-2016.
- Emam MM, Khattab HE, Helal NM, Deraz AE. 2014. Effect of selenium and silicon on yield quality of rice plant grown under drought stress. *Australian Journal of Crop Science*. 8(4): 596-605.
- Epstein E. 1994. The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 91: 11-17.
- Essington ME. 2005. *Soil and Water Chemistry: An Integrative Approach*. CRC Press.
- Fageria NK. 2014. *Mineral Nutrition of Rice*. CRC Press, Boca Raton.
- Foy CD. 1992. Soil chemical factors limiting plant root growth. *Advances in Soil Science*. 19: 97-149. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2894-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2894-3_5).
- Fu YQ, Shen H, Wu DM, Cai KZ. 2012. Silicon-Mediated Amelioration of Fe<sup>2+</sup> Toxicity in Rice (*Oryza sativa* L.) roots. *Pedosphere*. 22(6): 795-802. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(12\)60065-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(12)60065-4).



- 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. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2005.00481.x>.
- Hayasaka T, Fujii H, Namai T. 2005. Silicon content in rice seedlings to protect rice blast fungus at the nursery stage. *Journal of General Plant Pathology*, 71(3): 169-173. <https://doi.org/10.1007/s10327-005-0182-7>.
- Hiradate S. 2012. Utilization and research of silicon in recent agriculture. 2. Dissolution of silicic acid from soils and soil minerals. *Journal of the Science of Soil and Manure Japan*. 83: 455-461. [https://doi.org/10.20710/dojo.83.4\\_455](https://doi.org/10.20710/dojo.83.4_455).
- Ittekkot V, Humborg C, Schäfer P. 2000. Hydrological alterations and marine biogeochemistry: a silicate issue. *BioScience* 50(9): 776-782. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2000\)050\[0776:HAAMBA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[0776:HAAMBA]2.0.CO;2).
- Jawahar S, Vijayakumar D, Bommera R, Jain N. 2015. Effect of silicon granules on growth and yield of rice. *Int J Curr Res Aca Rev*. 3(5): 74-80.
- Kim SG, Kim KW, Park EW, Choi D. 2002. Silicon-induced cell wall fortification of rice leaves: a possible cellular mechanism of enhanced host resistance to blast. *Phytopathology*. 92(10): 1095-1103. doi: 10.1094/PHYTO.2002.92.10.1095.
- Kim YH, Khan AL, Hamayun M, Kang SM., Beom YJ, Lee IJ. 2011. Influence of short-term silicon application on endogenous phytohormonal levels of *Oryza sativa* L. under wounding stress. *Biological Trace Element Research*. 144: 1175-1185. <https://doi.org/10.1007/s12011-011-9047-4>.
- Kochian LV, Hoekenga OA, Pineros MA. 2004. How do crop plants tolerate acid soil. Mechanisms of aluminium tolerance and phosphorous efficiency. *Annual Review of Plant Biology*. 55: 459-493. <https://doi.org/10.1146/annurev.arpant.55.031903.141655>.
- Korndörfer GH, Pereira HS, Nolla A. 2004. Silicon analysis in soil, plant and fertilizers. Brazil, GPSi/ICIAG/UFU.
- Lavinsky AO, Detmann KC, Reis JV, Ávila RT, Sanglard ML, Pereira LF, Sanglard LMVP, Rodrigues FA, Araújo WL, DaMatta FM. 2016. Silicon improves rice grain yield and photosynthesis specifically when supplied during the reproductive growth stage. *Journal of Plant Physiology*. 206: 125-132. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.09.010>.
- Lehmann J, Rillig MC, Thies J, Masiello CA, Hockaday WC, Crowley D. 2011. Soil biology & biochemistry biochar effects on soil biota e a review. *Soil Biology and Biochemistry*. 43(9): 1812-1836. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>.
- Liang Y, Nikolic M, Bélanger R, Gong H, Song A. 2015. Silicon In Agriculture: From Theory To Practice. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9978-2>.
- Libes S. 2009. Introduction to Marine Biogeochemistry. Second Edition. Academic Press, 925 pp.
- Ma J, Nishimura K, Takahashi E. 1989. Effect of silicon on the growth of rice plant at different growth stages. *Soil Science and Plant Nutrition*. 35: 347-356. <https://doi.org/10.1080/00380768.1989.10434768>.
- Ma JF, Miyake Y, Takahashi E. 2001. Silicon as a beneficial element for crop plants. p 17-39. *In: Datnoff LE, Synder GH, Korndorfer GH. (Eds). Silicon in Agriculture. Amsterdam (AN): Elsevier Science.*
- Ma JF. 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses, *Soil Science and Plant Nutrition*. 50(1): 11-18, <https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408447>.
- Manickam T, Cornelissen G, Bachmann RT, Ibrahim IZ, Mulder J, Hale SE. 2015. Biochar application in Malaysian sandy and acid sulfate soils: Soil amelioration effects and improved crop production over two cropping seasons. *Sustainability*. 7: 16756-16770. <https://doi.org/10.3390/su71215842>.
- Matichenkov VV, Calvert DV. 2002. Silicon as a beneficial element for sugarcane. *Journal American Society of Sugarcane Technologists*. 22: 21-30.

- Meena VD, Dotaniya ML, Coumar V, Rajendiran S, Ajay, Kundu S, Rao AS. 2014. A case for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils. *In Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B - Biological Sciences*. 84(3): 505-518. <https://doi.org/10.1007/s40011-013-0270-y>.
- Meharg, C., & Meharg, A. A. (2015). Silicon, the silver bullet for mitigating biotic and abiotic stress, and improving grain quality, in rice? *Environmental and Experimental Botany*. 120: 8-17. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.07.001>.
- Meirinawati H. 2018. Silikon terlarut untuk pertumbuhan diatom. *Oseana*. XLIII(1): 27-36. doi: <https://doi.org/10.14203/oseana.2018.vol.43no.1.10>.
- Ming DF, Pei ZF, Naeem MS, Gong HJ, Zhou WJ. 2012. Silicon alleviates PEG-induced water-deficit stress in upland rice seedlings by enhancing osmotic adjustment. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 198(1): 14-26. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00486.x>.
- Miranda SR. 2012. Calcium and magnesium Silicate, an Alternative Choice for liming acid soil, In: 8th International Symposium on Plant Soil Interactions at Low pH, 18-22 October, 2012, Bengalaru, India, 414–415.
- Miyake Y. 1993. Silica in soils and plants. *Sci. Rep. Faculty of Okayama Univ*. 81: 61-7.
- Mobasser HR, Yadi R, Azizi M, Ghanbari AM, Samdaliri M. 2009. Effect of density on morphological characteristics related-lodging on yield and yield components in varieties rice (*Oryza sativa* L.) in Iran. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science*.
- Perez CEA, Rodrigues FÁ, Moreira WR, DaMatta FM. 2014. Leaf gas exchange and chlorophyll a fluorescence in wheat plants supplied with silicon and infected with *pyricularia oryzae*. *Phytopathology*. 104(2): 143-9. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-06-13-0163-R>.
- Sumida H. 1992. Silicon supplying capacity of paddy soils and characteristics of silicon uptake by rice plants in cool regions in Japan. *Bulletin Tohoku Agric*. 851-46.
- Müller C, Kuki KN, Pinheiro DT, de Souza LR, Siqueira Silva AI, Loureiro ME, Oliva MA, Almeida AM. 2015. Differential physiological responses in rice upon exposure to excess distinct iron forms. *Plant and Soil*. 391: 123-138. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2405-9>.
- Mustafa AB, Santi LP, Goenadi DH. 2017. Potensi penggunaan biosilika untuk bioremediasi lahan sulfat masam di perkebunan kelapa sawit. *Hlm*. 104-116. *Prosiding Seminar Nasional Lahan Suboptimal 2017, "Pengembangan Ilmu dan Teknologi Pertanian Bersama Petani Lokal untuk Optimalisasi Lahan Suboptimal"*. Palembang 19-20 Oktober 2017.
- Nayar PK, Mishra AK, Patnik S. 1982. Silica in rice and flooded rice soils. I. Effects of flooding on the extractable silica in soils and its relation with uptake by rice. *Oryza*. 19: 34-40.
- Patra PK, Neue HU. 2010. Dynamics of water soluble silica and silicon nutrition of rice in relation to changes in iron and phosphorus in soil solution due to soil drying and reflooding. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 56(6): 605-622. <https://doi.org/10.1080/03650340903192042>.
- Pereira EG, Oliva MA, Rosado-Souza L, Mendes GC, Colares DS, Stopato CH, Almeida AM. 2013. Iron excess affects rice photosynthesis through stomatal and non-stomatal limitations. *Plant Science*. 201-202: 81-92. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2012.12.003>.
- Piperno DR. 1988. *Phytolith analysis – an archeological and ecological perspective*. San Diego, CA: Academic Press.
- Ragueneau O, Schultes S, Bidle K, Claquin P, Moriceau B. 2006. Si and C interactions in the world ocean: importance of ecological processes and implications for the role of diatoms in the biological pump. *Global Biogeochemical Cycles*. 20(4): 1-15. <https://doi.org/10.1029/2006GB002688>.
- Ranganathan S, Suvarchala V, Rajesh YBRD, Prasad MS, Padmakumari AP, Voleti SR. 2006. Effect of silicon sources on its deposition, chlorophyll content, and disease and pest resistance in rice. *Biologia Plantarum*. 50(4): 713-716. <https://doi.org/10.1007/s10535-006-0113-2>.

- Sahrawat KL. 2004. Iron toxicity in wetland rice and the role of other nutrients. *Journal of Plant Nutrition*. 27(8): 1471-1504. <https://doi.org/10.1081/PLN-200025869>.
- Sanglard LMVP, Detmann KC, Martins SCV, Teixeira RA, Pereira LF, Sanglard ML, Fernie AR, Araújo WL, DaMatta FM. 2016. The role of silicon in metabolic acclimation of rice plants challenged with arsenic. *Environmental and Experimental Botany*. 123: 22-36. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.11.004>.
- Savant NK, Snyder GH, Datnoff LE. 1996. Silicon management and sustainable rice production. *Advances in Agronomy*. 58: 151-199. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60255-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60255-2).
- Shamshuddin J, Elisa AA, Shazana MARS, Fauziah IC. 2013. Rice defense mechanisms against the presence of excess amount of  $Al^{3+}$  and  $Fe^{2+}$  in the water. *Australian Journal of Crop Science*. 7(3): 314-320.
- Siregar AF, Husnain, Sato K, Wakatsuki T, Masunaga T. 2016. Empirical study on effect of silicon application on rice blast disease and plant morphology in Indonesia. *Journal of Agricultural Science*; 8(6): 137-148. <https://doi.org/10.5539/jas.v8n6p137>.
- Smayda TJ. 1997. Bloom dynamics: Physiology, behavior, trophic effects. *Limnology and Oceanography*. 42(5 part 2): 1132-1136.
- Sposito G. 2008. *The Chemistry of Soils* (2nd ed.), p. 329. Oxford University Press, New York, USA.
- Sommer M, Kaczorek D, Kuzyakov Y, Breuer J. 2006. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes - A review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 169(3): 310-329. <https://doi.org/10.1002/jpln.200521981>.
- Song A, Li P, Fan F, Li Z, Liang Y. 2014. The effect of silicon on photosynthesis and expression of its relevant genes in rice (*Oryza sativa* L.) under high-zinc stress. *PLoS ONE*. 9(11): e113782. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113782>.
- Stein RJ, Duarte GL, Spohr MG, Lopes SIG, Fett JP. 2009. Distinct physiological responses of two rice cultivars subjected to iron toxicity under field conditions. *Annals of Applied Biology*. 154(2): 269-277. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2008.00293.x>.
- Stein RJ, Lopes SIG, Fett JP. 2014. Iron toxicity in field-cultivated rice: Contrasting tolerance mechanisms in distinct cultivars. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*. 26: 135-146. <https://doi.org/10.1007/s40626-014-0013-3>.
- Struyf E, Smis A, van Damme S, Meire P, Conley DJ. 2009. The global biogeochemical silicon cycle. *Silicon* 1: 2007-2013. <https://doi.org/10.1007/s12633-010-9035-x>.
- Van Cappellen P. 2003. Biomineralization and global biogeochemical cycles. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 54(1): 357-381. <https://doi.org/10.2113/0540357>.
- Yanai J, Taniguchi H, Nakao A. 2016. Evaluation of available silicon content and its determining factors of agricultural soils in Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*. 62(5-6): 511-518. <https://doi.org/10.1080/00380768.2016.1232601>.
- Yilmaz A. 2017. Topic 14: Nutrients. [www.iocccg.org/training/turkey/DrYilmaz\\_lecture2.pdf](http://www.iocccg.org/training/turkey/DrYilmaz_lecture2.pdf). Diakses pada tanggal 22 Desember 2017.

