

Potensi Penggunaan Biosilika untuk Bioremediasi Lahan Sulfat Masam di Perkebunan Kelapa Sawit

Potential Use of Biosilica for Acid Sulphate Soils Bioremediation in Oil Palm Plantations

Ade Brian Mustafa, Laksmi Prima Santi, Didiek Hadjar Goenadi
Indonesian Research Institute for Biotechnology and Bioindustry
Riset Perkebunan Nusantara
Jl Taman kencana No 1 Bogor 16128, Indonesia
Penulis untuk korespondensi: Tel. +6287874003329
E-mail: adebrianmustafa@gmail.com

ABSTRACT

Soil utilization on acid sulphate ecosystem is frequently have constraints due to low pH as the result of pyrite oxidation releasing Al, Fe, and others heavy metal due to increasing their solubility. These problems show the evidence of aluminium and heavy metal toxicity due to low pH. Plant ecophysiology generally show growth and development problems which concomitantly impact on their productivity. Available Si on tropical soil is just one fifth abundance level compared with subtropical soils, resulting in low Si availability. Silica deficiency on soils should be taken into consideration seriously due to high beneficial aspect of Si, such as bioremediation agent of heavy metals on acid sulphate soils. *Ortho-silicic-acid* (OSA) could improve plant tolerance to drought and reducing potential toxicity. Silica bioregulation in plant have been widely reported. Currently, research on Si solubilizing bacteria (SSB) starts to be developed. Several strains of SSB such as *Burkholderia cenocepacia*, *Aeromonas punctata*, *Burkholderia vietnamiensis*, and *Aspergillus niger* can significantly increase Si availability from unavailable form in the soils. In contrast, Si-containing material exploration is highly intensified. The combination with other compound such as calcium silicate may also increase Ca availability in the soils. This paper reviews potential development of biosilica, a consortium of SSB and carrier-based Si for bioremediation purposes and its possible effects on plant productivity, especially oil palm.

Keywords: aluminium, oil palm, ortho-silicic acid, acid sulphate soils

ABSTRAK

Pemanfaatan tanah dalam ekosistem sulfat masam 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. Ekofisiologi tanaman umumnya mengalami gangguan yang berkaitan dengan permasalahan di tanah sulfat masam 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. Kekurangan Si tersedia dalam tanah harus ditangani secara serius karena Si memiliki beragam manfaat, di antaranya berpotensi sebagai agen bioremediasi untuk mereduksi tingginya kelarutan logam berat pada tanah

Editor: Siti Herlinda et. al.
ISBN: 978-979-587-748-6

sulfat masam. Penggunaan unsur Si, khususnya dalam bentuk *ortho-silicic-acid* (OSA) mampu meningkatkan ketahanan tanaman terhadap kekeringan dan menurunkan potensi keracunan oleh aluminium dan logam berat lainnya. Bioregulasi Si terhadap tanaman telah banyak dilaporkan. Pada saat ini, kegiatan riset terkait penggunaan berbagai bakteri pelarut Si untuk penyediaan Si terlarut yang dapat digunakan oleh tanaman terus dikembangkan. Beberapa spesies bakteri pelarut Si seperti *Burkholderia cenocepacia*, *Aeromonas punctata*, *Burkholderia vietnamiensis*, serta *Aspergillus niger* dilaporkan mampu meningkatkan kelarutan Si-sukar larut di dalam tanah. Selain itu, eksplorasi sumberdaya material mengandung Si terus dilakukan. Kombinasinya dengan senyawa lain seperti kalsium silikat dapat meningkatkan ketersediaan Ca dalam tanah. Makalah ini menyajikan potensi dan pengembangan serta aplikasi biosilika, kombinasi bakteri pelarut dan bahan pembawa Si, sebagai sarana bioremediasi tanah sulfat masam serta korelasinya terhadap produktivitas tanaman, khususnya komoditas kelapa sawit.

Kata kunci: aluminium, kelapa sawit, ortho-silicic acid, sulfat masam

PENDAHULUAN

Pengembangan perkebunan kelapa sawit di lahan marginal saat ini ditempuh karena semakin terdesak dengan makin berkembangnya jumlah penduduk, industri, dan berkurangnya lahan subur. Salah satu contoh pengembangan tersebut terjadi di lahan pasang surut. Potensi lahan pasang surut di Indonesia sekitar 20,1 juta hektar, yang terdiri dari 2,07 juta hektar lahan potensial, 6,72 juta hektar lahan sulfat masam, 10,8 juta hektar lahan gambut, dan 0,44 juta hektar lahan salin. Lahan pasang surut yang berpotensi untuk dijadikan areal pertanian sekitar 9,53 juta hektar, yang sudah direklamasi sampai tahun 2000 baru sekitar 4,18 juta hektar, sisanya masih merupakan lahan yang belum dimanfaatkan. Karakteristik mineralogi tanah sulfat masam penting diketahui karena komposisi bahan kimianya memegang peranan penting dalam mengendalikan perilaku ion-ion dalam larutan tanah (Alwi 2011).

Menurut Suastika *et al.* (2014) lahan sulfat masam tergolong lahan yang marginal dan *fragile* (rapuh) yang dicirikan oleh adanya lapisan tanah yang mengandung pirit 2,0% atau lebih pada kedalaman kurang dari 50 cm. Lahan sulfat masam memiliki horizon sulfidik dan atau sulfurik pada kedalaman 120 cm dari permukaan tanah mineral. Di lapangan banyak cara dan ciri dapat digunakan untuk mengidentifikasi adanya lapisan pirit.

Sitinjak (2017) mengemukakan bahwa dari aspek pH, kemasaman tanah yang tinggi berdampak negatif terhadap sifat kimia dan aktivitas mikrob tanah karena tidak semua mikrob tanah mampu bertahan dalam kondisi tanah sangat masam. Permasalahan keterbatasan spektrum pH tanah ini dapat diatasi dengan upaya meningkatkan nilai pH tanah sehingga diversitas mikroba rhizosfir juga meningkat. Pemberian silika dapat meningkatkan nilai pH tanah dan integrasi biosilika mampu meningkatkan kelarutan silika tersedia dalam tanah.

Landasan ilmu pengetahuan terkait lahan sulfat masam untuk pengembangan wilayah sangat diperlukan. Peningkatan perekonomian nasional dengan mendorong produktivitas dan peningkatan kualitas produk hasil perkebunan Indonesia harus diwujudkan. Perluasan areal wilayah tanam pada zonasi tanah sulfat masam tidak dapat dihindarkan. Remediasi lahan sulfat masam diperlukan untuk mengurangi berbagai potensi negatif yang selanjutnya dapat mempengaruhi produktifitas lahan.

POTENSI DAN TANTANGAN LAHAN SULFAT MASAM UNTUK PERKEBUNAN KELAPA SAWIT

Pengembangan komoditas kelapa sawit sebagai pendorong perekonomian nasional harus terus diperbaiki dan dipertahankan. Winarna *et al.* (2014) mengemukakan bahwa peluang usaha agribisnis perkebunan kelapa sawit di Indonesia cukup terbuka berkaitan dengan meningkatnya permintaan minyak kelapa sawit dunia. Dewasa ini terdapat lebih kurang 10 juta ha areal perkebunan kelapa sawit. Meskipun demikian, usaha agribisnis perkebunan kelapa sawit di Indonesia saat ini dihadapkan pada keterbatasan sumber daya lahan yang memiliki karakteristik optimum untuk pertumbuhan dan produksi tanaman kelapa sawit, sehingga pengembangan perkebunan kelapa sawit di Indonesia akhirnya mengarah ke lahan-lahan marjinal dengan berbagai faktor pembatas seperti lahan dengan topografi curam dan lahan rawa (rawa pasang surut termasuk lahan gambut).

Lahan pasang surut memiliki potensi untuk pengembangan kelapa sawit baik didasarkan pada karakteristik lahan maupun luasannya, namun demikian masalah utama yang dihadapi adalah kondisi drainase yang terhambat-tergenang. Firmansyah (2014) menambahkan bahwa tanaman kelapa sawit (*Elaeis guineensis Jacq*) merupakan tanaman yang memiliki sebaran adaptasi cukup luas, dapat tumbuh pada berbagai agroekosistem dengan baik dan memberikan potensi produksi yang optimal mulai dari tanah-tanah di lahan kering (Ultisol, Inceptisol, Oxisol) hingga tanah-tanah yang berkembang di agroekosistem rawa pasang surut (Gambut, sulfat masam). Subagyono *et al.* (1994) dalam Winarna (2014) menjelaskan bahwa sebanyak 6 juta ha lahan rawa pasang surut berpotensi untuk dikembangkan sebagai lokasi budidaya kelapa sawit di Indonesia. Suastika *et al.* (2014) melaporkan bahwa luas total lahan rawa sebesar 34,7 juta ha, dengan 27,8 juta ha yang termasuk dalam tanah mineral (dominasi Inceptisols dan Entisols). Namun, kondisi ekosistem tanah sulfat masam yang sensitif terhadap perlakuan antropogenik saat ini perlu mendapat perhatian khusus demi keberlanjutan perkebunan dan produktivitasnya.

Interaksi mikroorganisme dan fisika kimia tanah sulfat masam mempengaruhi penggunaan lahan tersebut untuk digunakan dalam berbagai aspek. Wilayah pengembangan perkebunan kelapa sawit pada tanah sulfat masam diprediksi akan terus bertambah. Shamshuddin *et al.* (2014) mengemukakan bahwa melalui manajemen praktik yang baik dan benar, pada tanah sulfat masam, kelapa sawit dapat tumbuh dengan baik dengan hasil panen optimal dibandingkan dengan tanah normal lainnya. Kelapa sawit dapat bertahan pada pH 4,3 hingga 6,5 pada kondisi tanah jenuh air. Faktanya, tanaman ini tumbuh dengan lebih baik pada kondisi lembab dibandingkan kering. Kekurangan air dapat terjadi pada tanah sulfat masam dalam kondisi kering *irreversible* yang dapat mengganggu pertumbuhan tanaman sawit. Kelapa sawit toleran terhadap tanah masam dan dapat memberikan output yang optimal melalui manajemen terpadu pengelolaan lahan sulfat masam. Pemasaman tanah (*soil acidification*) merupakan permasalahan lingkungan yang serius yang mempengaruhi perekonomian beberapa tahun terakhir karena membatasi produktivitas tanaman pada level perdagangan. Penurunan pH pada tanah dapat bersifat merusak dalam cakupan meningkatkan kerentanan tanaman terhadap keracunan yang diakibatkan meningkatnya kelarutan aluminium (Singh *et al.* 2017). Dinamika kelarutan aluminium didalam tanah sangat bervariasi. Susanti (2008) menjelaskan bahwa tanah sulfat masam umumnya memiliki pH sekitar 3. Hal tersebut terjadi akibat oksidasi pirit yang menghasilkan asam sulfat. Kemasaman tanah yang tinggi ini menyebabkan meningkatnya kelarutan Fe dan Al sehingga mengakibatkan tanaman budidaya pertanian menjadi sulit tumbuh secara normal. Untuk mengatasi masalah tanah sulfat masam umumnya dilakukan dengan pengapuran hingga pH meningkat menjadi >5,5 di mana Al^{3+} akan mengendap

menjadi bentuk yang tidak meracuni tanaman. Akan tetapi endapan Al ini tidak bersifat stabil pada tanah sulfat masam karena adanya fluktuasi pH menurut musim. Pada awal musim hujan, pH turun drastis menjadi sekitar pH 3 sebagai akibat dari terlarutnya asam yang terbentuk dari proses oksidasi pirit yang terakumulasi selama musim kemarau. Penurunan pH ini menyebabkan endapan aluminium hasil dari pengapuran akan larut kembali karena kelarutan aluminium tergantung pada pH. Oleh karena itu untuk mengatasi masalah keracunan aluminium perlu dicari bahan amelioran yang mampu menekan kelarutan Al tanpa terpengaruh fluktuasi pH.

Secara umum, permasalahan logam berat dalam tanah sulfat masam seperti tingginya konsentrasi aluminium dan besi akibat proses oksidasi pirit yang dihasilkan dapat menurunkan produktivitas tanaman dan meracuni tanah (Sumawinata dan Dwi 2009). Keracunan aluminium pada tanah masam merupakan permasalahan produksi pertanian utama di dunia. Keracunan aluminium secara potensial menghasilkan interaksi kompleks Al dengan apoplas (dinding sel), membran plasma, dan simplas (sitosol) pada jaringan tanaman (Singh *et al.* 2017). Shamshuddin (2006) juga menyatakan bahwa pertumbuhan kelapa sawit tumbuh secara optimal pada umur tanam muda, namun akibat permukaan air tanah yang menurun, dedaunan pada kelapa sawit menunjukkan gejala keracunan Al. kandungan aluminium yang tinggi ini juga mempengaruhi pertumbuhan akar tanaman. Shamshuddin *et al.* (2014) melaporkan bahwa laju pertumbuhan bibit tanaman kelapa sawit terbaik terdapat pada perlakuan tanah dengan kelarutan kation Al terendah dan kondisi jenuh air. Hal tersebut juga didukung oleh data bahwa pengaruh penjumlahan air menyebabkan konsentrasi kation dan anion basa meningkat dan peningkatan pH dan EC. Tingkat kelarutan Al yang rendah juga mendorong peningkatan panjang akar dan tinggi tanaman kelapa sawit.

SILIKA DALAM TANAH

Senyawa silika di tanah umumnya ditemukan dalam bentuk SiO_2 dan beragam bentuk alumino silikat (Adrees *et al.* 2015). Dalam bentuk padat di tanah, Si meliputi bentuk kuarsa, bersama dengan silikat kristalin (plagioklas, ortoklas, dan feldspar), mineral klei sekunder (kaolinit, vermikulit, dan smektit) dan silika amorf. Bentuk-bentuk tersebut hanya sedikit bagian yang mudah larut dan secara biogeokimia bersifat inert. Fase cair dari Si dalam tanah sangat kompleks namun sangat penting secara agronomi. Bentuk tersebut meliputi asam monosilikat (H_4SiO_4) dan berada dalam kisaran 3 hingga 17 mg Si per liter pada pH dibawah 9. Pada pH diatas 9, asam silikat akan berdisosiasi menjadi ion silikat (Imtiaz *et al.* 2016) Imtiaz *et al.* (2016) juga mengemukakan bahwa silika ditemukan dalam tanah dalam bentuk mineral primer dan sekunder. Fraksi pasir dan debu memiliki kandungan mineral silikat primer sementara fraksi klei mengandung silikat sekunder, hal ini terjadi karena proses pedogenesis. Secara umum, akibat proses disolusi senyawa Si dan reaksi erapan antara silika dalam fase larut dengan komponen matriks tanah, konsentrasi Si dalam larutan tanah bervariasi. Mekanisme pertukaran ligan pada proses oksidasi dan hidroksida Fe dan Al dapat berkompetisi dengan Si dan anion lainnya pada proses jerapan pada permukaan mineral. Faktor utama yang mempengaruhi pengambilan (*uptake*) Si larut ini diakibatkan karena pelapukan, pencucian, tanah masam dengan kejenuhan basa yang rendah. Umumnya, tanaman dapat mengambil Si dalam fase larut pada kondisi tanah yang belum terlapuk sempurna, secara geologi termasuk dalam mineral muda pada tanah jika dibandingkan dengan tanah masam, tanah dengan tingkat pelapukan lanjut, tanah tercuci (*leached soils*) dan tanah dengan kandungan kejenuhan basa rendah. Hal ini menurut analisis dari Haynes (2014) menyatakan bahwa konsekuensi utama dari pelapukan secara

Editor: Siti Herlinda et. al.
ISBN: 978-979-587-748-6

kimiawi mineral silikat primer (desilikasi) menentukan status silika dalam tanah. Pelapukan (*weathering*) ini akan melepaskan kation-kation basa mobil dalam jumlah besar (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , dan Na^+), mobil moderat ($\text{Si}(\text{OH})_4$), dan immobil seperti Al dan Fe kedalam larutan tanah. Bagian dari Si dilepaskan dari struktur mineral yang berinteraksi dengan Al untuk membentuk mineral klei sekunder, sedangkan sisanya mengalami pencucian. Sebagai konsekuensinya, kebanyakan tanah-tanah akan mengalami pengurangan (kehilangan) Si dan kation basa selama proses pelapukan. Lebih lanjut, faktor utama yang menentukan konsentrasi Si dalam larutan tanah adalah kelarutan mineral primer dan sekunder dan semakin berkembangnya tanah (*soil development*), maka konsentrasi Si semakin rendah. Tanah yang lebih terlapuk dengan Si larut yang lebih rendah juga memiliki nilai pH lebih rendah. Pada tanah tropika yang sering dilakukan budidaya pertanian seperti Ultisol dan Oxisol memiliki kandungan Si yang lima hingga sepuluh kali lebih rendah dibandingkan dengan tanah-tanah didaerah temperate (Haynes 2014). Tanah sulfat masam di Indonesia didominasi oleh Inceptisols (Endoaquepts, Sulfaquepts) dan Entisols (Hidraquepts), dengan pH yang rendah tentunya tanah tropik ini pun memiliki kandungan Si yang rendah. Perlunya inovasi pengembangan silika di Indonesia sangat penting untuk menyediakan sejumlah Si yang tersedia pada tanah dan dapat segera dimanfaatkan tanaman.

PERANAN BIOSILIKA

Sifat fitogenik Si pada tanaman perlu dikaji lebih mendalam. Eksportasi tanaman (bahan organik maupun serasah) tanpa dilakukan pengembalian Si kedalam tanah akan mengurangi ketersediaan Si itu sendiri. Haynes (2014) mengemukakan dalam beberapa tahun terakhir, pentingnya siklus Si melalui *pool* fitogenik dalam ekosistem tanah semakin diperkenalkan. Perbaikan sistem manajemen pertanian untuk mengembalikan bahan organik ke dalam tanah juga dapat mendorong peningkatan Si dalam tanah, namun dengan pemberian Si tersedia kedalam tanah (input) dapat meningkatkan konsentrasi Si. Dobermann dan Fairhurst (2000) menyatakan bahwa konsentrasi Si kritis dalam tanah untuk pertanaman adalah 40 mg kg^{-1} . Silika memiliki efek yang besar sebagai biostimulator untuk pertumbuhan dan perkembangan tanah. Manfaat Si pada tanaman meliputi pengurangan stress terhadap cekaman salinitas, nutrisi/ hara, dan kekeringan serta kondisi stress yang disebabkan oleh kondisi iklim, mitigasi keracunan logam berat dan unsur metaloid, serta penundaan proses penuaan tanaman. Mekanisme kunci yang terlibat karena mediasi Si untuk mengurangi cekaman abiotik pada tanaman mencakup: (1) perubahan anatomi pada jaringan tanaman karena deposisi phytoliths yang selanjutnya menyebabkan/ memberikan kekakuan (*rigidity*) dan modulasi nutrien serta mobilitas air dalam tanaman, (2) peningkatan sistem pertahanan antioksidan pada tanaman, (3) imobilisasi logam toksik melalui kompleksasi atau co-presipitasi dengan Si pada jaringan tanaman dan tanah, dan modulasi ekspresi gen dan pensinyalan melalui fitohormon, yang menurut pengetahuan saat ini nampaknya tidak langsung.

Biosilika merupakan integrasi pemanfaatan mikroba potensial pelarut silika baik secara individual ataupun konsorsiumnya untuk meningkatkan kelarutan silika tersedia yang dapat segera dimanfaatkan oleh tanaman maupun interaksinya dengan tanah dalam berbagai tujuan penggunaan. Biosilika secara ringkas adalah aktivasi silika dengan bakteri pelarut silika. Santi *et al.* (2017) merancang konsep pembuatan material silika tersedia bagi tanaman dalam bentuk *ortho silicic acid* yang dikombinasikan dengan pemanfaatan bakteri pelarut silika (biosilika).

BIOREMEDIASI LAHAN SULFAT MASAM DENGAN SILIKA DAN BAKTERI PELARUT SILIKA TERKAIT ALUMINIUM DAN LOGAM BERAT

Studi mengenai ameliorasi tanah sulfat masam untuk perkebunan kelapa sawit menggunakan batukapur (limestone) dan abu tandan kelapa sawit (bunch ash) sudah dilakukan. Menurut Yeow *et al.* (1977) dalam Shamshuddin *et al.* (2014), abu tandan ini memiliki tingkat pH basa yang tinggi, mengandung 41% K₂O, 4% P₂O₅, 6% MgO, dan 5% CaO. Abu ini merupakan material baik untuk meningkatkan pH tanah. Hasil menunjukkan bahwa abu tandan ini secara signifikan meningkatkan ketersediaan K yang mempengaruhi kandungan K dalam daun tanaman. Disatu sisi, aplikasi kapur meningkatkan kandungan Ca dan Mg. Aplikasi keduanya meningkatkan produksi (*yield*) kelapa sawit.

Keragaman dalam manajemen tanah sulfat masam bervariasi. Menurut Shamshuddin *et al.* (2014) biaya pengapuran untuk mengurangi keracunan Al cukup besar. Shamshuddin dan Auxtero (1991) merekomendasikan untuk menjaga muka air atas lapisan pirit, namun hal ini hanya dapat diimplementasikan pada Sulfic Tropaquepts, tapi tidak untuk Sulfaquepts, sustansi toksik kemungkinan dapat terbawa ke permukaan ketika penggenangan terjadi. Solusi remediasi untuk mengurangi kelarutan Al dan permasalahan lainnya pada ekosistem tanah sulfat masam merupakan langkah tepat. Remediasi menggunakan silika untuk tanah sulfat masam belum banyak diteliti. Ratnasari (2016) melaporkan bahwa dosis pemberian Si sampai dengan 96 gram/tanaman belum mampu menginduksi ketahanan tanaman kelapa sawit terhadap keracunan Al, sehingga dosis yang lebih besar diperkirakan dapat menginduksi tanaman kelapa sawit. Ratnasari (2016) juga menyarankan menggunakan dosis Si > 96 gram/tanaman sehingga dapat ditentukan dosis pemberian Si yang optimal untuk menginduksi ketahanan tanaman kelapa sawit terhadap keracunan Al. Salah satu hasil penelitian lain merujuk pada publikasi Elisa *et al.* (2016) terkait penggunaan kalsium silikat (CaSiO₃) untuk mereduksi Al. Kalsium silikat yang digunakan memiliki komposisi SiO₂ = 40-55, kalsium (sebagai CaO) = 40-50, Al₂O₃ = dibawah 1,5, MgO = dibawah 3, besi (sebagai Fe₂O₃) = dibawah 1 %, dan pH = 8,54. Aplikasi kalsium silikat menunjukkan penurunan Al-dd sebanyak 74% dari 4,26 menjadi 0,82 cmol_c kg⁻¹ selama 120 hari dengan perlakuan 3 ton kalsium silikat per Ha. Meskipun begitu, pada perlakuan 60 hari dan 90 hari tidak menunjukkan efek yang signifikan dalam penurunan Al-dd. Penurunan Al-dd terjadi signifikan pada perlakuan pemberian kalsium silikat. Elisa *et al.* (2016) menjelaskan bahwa kalsium silikat juga mampu meningkatkan ketersediaan Ca dan Si dalam tanah dari 1,68 menjadi 4,94 cmol_c kg⁻¹ dan dari 21,21 menjadi 81,71 mg kg⁻¹. Efek penggunaan kalsium silikat terhadap pH tanah dengan perlakuan 3 ton per Ha mampu meningkatkan pH dari 2,90 menjadi 3,95 selama 120 hari. Berdasarkan studi tersebut, kalsium silikat dapat menetralisasi ion H⁺ dalam tanah, sebagaimana pH tanah pada tanah sulfat masam yang meningkat akibat penambahan kalsium silikat. Selama masa inkubasi, hubungan antara kalsium silikat dan pH tanah sangat kuat. Peningkatan koefisien korelasi yang terjadi berkaitan dengan peningkatan kapasitas tanah dalam menyerap anion silikat.

Batas kritis kandungan silika tanah perlu diketahui untuk dosis pemberian silika ke dalam tanah. Kandungan kritis ini bervariasi tergantung dari jenis tanah, tanaman yang diusahakan, dan metode uji tanah yang dilakukan. Korndörfer *et al.* (2001) mengkategorikan nilai batas kritis uji silika tanah dengan batas >24, 6-24, dan <6 mg kg⁻¹ silika tanah yang diinterpretasikan sangat tinggi, sedang, dan rendah, dan selanjutnya perlu diberikan tambahan dengan 0,1120 dan 1500 kg silika ha⁻¹ secara berturut-turut sesuai nilai kritis tersebut. Berdasarkan penelitian Elisa *et al.* (2016) untuk mengurangi toksisitas logam berat dan defisiensi silika pada tanah sulfat masam, pemberian 2 hingga 3 Ton ha⁻¹

dapat meningkatkan kandungan Si hingga 40,81 hingga 83,53 mg kg⁻¹ silika tanah dengan kisaran waktu 60 hingga 90 hari setelah aplikasi. Kelarutan Al dapat dipertukarkan secara signifikan berkurang hingga 1,89 cmol_c kg⁻¹ hingga aplikasi selama 90 hari.

Peran penting kalsium silikat ini dalam mengurangi dampak keracunan Al dijelaskan oleh Datnof *et al.* (2001) dalam lima mekanisme utama: (1) asam monosilikat meningkatkan pH tanah, (2) asam monosilikat menjerap Al hidroksida dan mengurangi mobilitasnya, (3) asam monosilikat larut membentuk substansi larut dengan ion Al, (4) Al yang mobil secara kuat terjerap dalam permukaan silika, dan (5) senyawa silika mobil meningkatkan toleransi tanaman terhadap Al. Anion silikat akan menetralkan H⁺ dalam larutan tanah. Anion silikat yang menjerap ion H⁺ ini selanjutnya membentuk asam monosilikat (H₄SiO₄). Asam monosilikat akan membentuk kompleks dengan Al³⁺ dalam larutan tanah selanjutnya terbentuk aluminosilat *nontoxic* dan senyawa aluminosilikat hidroksil yang terpresipitasi pada zona akar. Essington (2005) mengemukakan bahwa peningkatan silika dalam tanah terjadi akibat proses hidrolisis mineral silikat akibat interaksi dengan tanah sulfat masam. Reaksi tersebut terjadi sebagai berikut.



Pada reaksi tersebut, kation basa umumnya merupakan Mg²⁺ atau Ca²⁺ H₂CO₃ sebagai sumber proton, HCO₃⁻ sebagai bikarbonat, H₄SiO₄ sebagai asam silikat, dan gibbsite [Al(OH)₃] yang merupakan contoh representatif dari mineral aksesori. Elisa *et al.* (2016) menambahkan bahwa silika yang dilepaskan dari kalsium silikat ke dalam larutan tanah dapat diserap tanaman dalam bentuk Si(OH)₄. Tentunya dapat berinteraksi dengan ekofisiologi tanaman mempengaruhi struktur yang beragam dan aspek dinamis tanaman serta performa hasil panen. Meskipun Si bukan merupakan unsur utama yang mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tanaman, unsur Si merupakan element yang esensial dan telah banyak dilaporkan menyokong pertumbuhan tanaman dalam kondisi cekaman abiotik maupun biotik. Keunggulan dari pemanfaatan silika sebagai remediasi lahan sulfat masam sangat utama mengingat hasil penelitian Elisa *et al.* (2016) yang menyatakan bahwa aplikasi kalsium silikat menunjukkan efek amelioratif pada tanah sulfat masam secara fisik dan kimia meliputi peningkatan pH tanah, kalsium dapat dipertukarkan, dan kandungan Si, serta penurunan aluminium dapat dipertukarkan. Aplikasi kalsium silikat terhadap tanah sulfat masam menunjukkan efek perbaikan yang segera. Peningkatan dosis kalsium silikat akan meningkatkan kandungan Ca dalam tanah secara signifikan. 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 beraksi dengan kation logam multivalen seperti Mg²⁺, Ca²⁺, Fe³⁺, Cu²⁺, Zn²⁺, dan Pb²⁺, untuk meng-immobilisasi logam dan presipitasi mineral metal silikat tidak larut. Lebih lanjut perlakuan silika ini dapat digunakan untuk mencegah oksidasi pirit.

Camenzuli dan Damian (2013) menerangkan bahwa enkapsulasi hidrokarbon dengan perlakuan silika terjadi dengan reaksi dua tahap. Hidrokarbon yang dienkapsulasi dengan perlakuan silika bersifat ramah lingkungan dan tahan terhadap degradasi, bahkan di lingkungan pH rendah (<4). Tahap pertama biasanya melibatkan penerapan pengemulsi untuk menghilangkan hidrokarbon dari tanah, diikuti dengan aplikasi larutan silika alkali. Reaksi asam-basa yang terjadi antara larutan silika dan misel pengemulsi dan selanjutnya

dinetralisir, menghasilkan pembentukan mantel (*shell*) silika mikroskopis, yang mengenkapsulasi hidrokarbon. Sebagai alternatif, larutan silikat berbasis basa sangat dapat diaplikasikan terlebih dahulu, diikuti oleh larutan berbasis polimer asam lemah. Penerapan larutan asam setelah penambahan larutan silikat dengan cepat akan mengurangi pH dan mendorong cepat imobilisasi atau enkapsulasi kontaminan. Di tanah yang sangat asam, buffering pH diperlukan sebelum aplikasi perlakuan untuk mencegah polimerisasi silika terlarut sebelum imobilisasi atau enkapsulasi. Proses yang bertanggung jawab untuk pembentukan mineral silikat logam yang tidak larut dan enkapsulasi hidrokarbon dengan perlakuan silika adalah reaksi hidrasi dan dehidrasi, reaksi presipitasi, dan polimerisasi atau gelasi. Inovasi sodium metasilikat (pengembangan dari Mbhele 2007) oleh Camenzuli *et al.* (2013) adalah komponen utama dalam perlakuan silika. Perlakuan bervariasi tergantung pada kontaminan yang sedang ditanggulangi; misalnya, perlakuan yang disesuaikan untuk situs yang terkontaminasi hidrokarbon umumnya mengandung surfaktan, seperti natrium laurel sulfat atau asam asetat. Penambahan surfaktan atau asam secara signifikan dapat meningkatkan keefektifan enkapsulasi karena struktur amphiphil dari surfaktan yang mendorong terjadinya media asam pada tanah yang terkontaminasi yang meningkatkan presipitasi silika. Sementara surfaktan dapat meningkatkan efisiensi enkapsulasi hidrokarbon, sebaiknya hanya digunakan dengan hati-hati karena toksisitasnya untuk biota perairan dan kapasitas untuk memobilisasi kontaminan logam. Penambahan kalsium karbonat (CaCO_3) sebagai perlakuan silika yang ditujukan untuk mengimobilisasi logam-logam sangat bermanfaat karena dapat meningkatkan pembentukan mineral metal-silikat dan kalsium-silikat, sehingga meningkatkan efisiensi imobilisasi.

Exhibit 1. Summary table of silica based treatments used for the immobilization or encapsulation of contaminants

Reference	Composition	Starting pH	Contaminant Treated
Arocha et al. (1996)	SiO_2 , Na_2O and H_2O	11.3	Hydrocarbons
Billings and Burns (1997)	Two-step treatment Solution 1: Na_2SiO_3 , $\text{C}_6\text{H}_{15}\text{NO}_3$, $\text{C}_8\text{H}_{17}\text{NaO}_4\text{S}$, $\text{C}_{20}\text{H}_{40+2}\text{O}_{n+1}$, $\text{C}_8\text{H}_{17}\text{C}_6\text{H}_4$ (OCH_2CH_2) $_n$ OH and H_2O Solution 2: H_3PO_4 , $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$, acrylic polymer and H_2O	≥ 8	Hydrocarbons and metals
Fytas et al. (1999)	Various treatments consisting of Na_2SiO_3 , H_2O , NaOAc, CaCO_3 , H_2O_2 , and CaSO_4	Treatments ranged in pH from 5.75 to 12.6	Pyrite oxidation
Vandiviere and Evangelou (2004)	NaOAc, H_2O , $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ and Na_2SiO_3	Not reported	Pyrite oxidation
Hill and Ross (2012)	Na_2SiO_3 , surfactant (e.g., sodium laurel sulfate), ethylene glycol, and H_2O	10.5–11.9	Hydrocarbons, metals, and pesticides

Berbagai komposisi teknologi imobilisasi dan enkapsulasi dengan Silika.
 Camenzuli dan Damian (2013)

Saat memilih komposisi perlakuan silika yang paling sesuai, penting untuk mempertimbangkan jenis kontaminan yang ada dan dampak parameter lingkungan, seperti suhu, kelarutan, keadaan oksidasi, pH, dan karakter tanah yang mempengaruhi performa perlakuan. Hal ini terutama terjadi pada kasus dimana perawatan diterapkan secara *in situ*. Secara ringkas, Camenzuli *et al.* (2013) mengemukakan bahwa terdapat aspek perlakuan silika yang memerlukan penyidikan lebih lanjut. Aspek yang sangat penting adalah kebutuhan akan studi jangka panjang yang menunjukkan stabilitas hasil output yang

Editor: Siti Herlinda et. al.
 ISBN: 978-979-587-748-6

immobil atau di-enkapsulasi dengan perlakuan silika. Studi yang melaporkan hubungan langsung antara kondisi lingkungan, seperti kondisi tanah, suhu, pH, potensi reduksi oksidasi, perilaku mikroba, dan performa perlakuan, juga akan bermanfaat. Risiko lingkungan potensial yang terkait dengan perawatan silika juga harus diteliti. Silika memiliki potensi pengembangan sebagai sumber remediasi sekaligus penyediaan sumber Si tersedia pada tanah. Strategi pengembangan silika di Indonesia perlu mendapat perhatian yang lebih sebagaimana keunggulan-keunggulan Si yang sudah dijelaskan diatas. Teknologi ekstraksi Si dari berbagai sumber seperti biomassa tanaman padi ataupun mineral kuarsa harus dikembangkan. Lahan di Indonesia membutuhkan banyak Si untuk mewujudkan kedaulatan pertanian dalam arti luas. Hasil riset pengembangan dan aplikasi biosilika sedang dilakukan oleh Santi *et al.* (2017).

Peningkatan kelarutan silika dapat diperoleh melalui mekanisme kinerja mikroba pelarut silika. Ekstraksi silika dapat juga dilakukan dari tandan kosong kelapa sawit. Omar *et al.* (2014) dalam Santi *et al.* (2017) melaporkan bahwa terdapat kandungan Si dalam serat tandan kosong kelapa sawit dengan kadar 11-19 %v/v. Selanjutnya, melalui serangkaian karakterisasi dan aktivasi bahan baku silika asal mineral kuarsa diperoleh hasil perolehan silika dari mineral kuarsa lebih besar dari pada yang bersumber asal tandan kelapa sawit. Permintaan biosilika dalam jumlah besar dapat dipenuhi dengan memanfaatkan potensi deposit mineral kuarsa yang cukup banyak. Penelitian Santi *et al.* (2017, *inpress*) menggunakan bahan baku mineral kuarsa yang berasal dari Belitung Timur, Provinsi Bangka Belitung karena kelimpahannya terukur sebanyak 59 juta ton. Disatu sisi, perkebunan kelapa sawit dapat juga melakukan upaya pengelolaan tandan kosong kelapa sawit dalam bentuk biochar atau pengomposan secara langsung untuk pengembalian Si kedalam tanah. Hal ini juga dapat dikembangkan secara terintegrasi untuk memanfaatkan limbah tandan kosong kelapa sawit yang masih belum banyak dimanfaatkan secara optimal. Santi *et al.* (2017) juga memaparkan bahwa fokus terhadap bakteri pelarut silika merupakan kunci pengembangan biosilika sehingga dapat membantu peningkatan ketersediaan Si pada tanah untuk tanaman.

Spesies bakteri pelarut silika yang digunakan adalah *Burkholderia cenocepacia*, *Aeromonas punctata*, dan *Burkholderia vietnamiensis*, yang merupakan kultur koleksi Pusat Penelitian Bioteknologi dan Bioindustri Indonesia. Isolat bakteri tersebut memiliki kemampuan melarutkan silika dengan sumber Si dari magnesium silika. Aktivasi unsur silika dalam bentuk silika terlarut dilakukan dengan menggunakan larutan asam dan basa. Asam yang dihasilkan oleh bakteri pelarut silika meliputi asam sitrat, oksalat, dan asetat. Kelarutan silika tertinggi terdapat pada spesies *B. cenocepacia* (0,84 ppm), *B. vietnamiensis* (0,81 ppm), dan *A. punctata* (0,32 ppm) selama waktu inkubasi 192 jam. Santi dan Goenadi (2013) melaporkan bahwa kemampuan bakteri tersebut dapat hidup dan memiliki viabilitas yang tinggi pada pH 3 hingga 5. Kemampuan tersebut dapat secara signifikan beradaptasi dengan lingkungan tanah sulfat masam yang memiliki pH rendah.

Bakteri pelarut silika (SSB) terdapat dalam tanah, air, sedimen air dan mineral silikat namun jumlahnya lebih kecil dari bakteri total yang menunjukkan keunikannya. Kemampuan isolat untuk melarutkan mineral silikat ditunjukkan melalui *plant assay liquid culture*. Beberapa bakteri pelarut silika yang lain seperti *Bacillus flexus*, *B. mucilaginosus*, *B. megaterium* dan *Pseudomonas fluorescens* dilaporkan secara baik dapat melarutkan magnesium trisilikat dan berbagai asam organik diproduksi oleh *B. mucilaginosus* dan *B. flexus* dalam feldspar dan kuarsa (Vasanthi 2016). Bakteri dari genus *Bacillus* dan *Pseudomonas* serta fungi dari genera *Aspergillus* dan *Penicillium* dilaporkan mampu melarutkan dua bentuk silika berbeda yaitu calamine dan garnierite (Castro 2000). Avakyan (1985) sudah sejak lama melaporkan strain *Bacillus mucilaginosus* mampu

mendorong pelepasan silikon dari mineral kuarsa. Data yang diperoleh menunjukkan mekanisme tidak langsung dimana ikatan siloksan terganggu oleh mekanisme dari ekso polisakarida. Interaksi bakteri pelarut silika ini bekerja pada site spesifik pada mineral silika. Mekanisme tersebut dijelaskan oleh Sheng *et al.* (2008) dalam Santi dan Goenadi (2017) yang menyatakan bahwa pelarutan silikat berkorelasi dengan asidolisis, hidrolisis alkalin, degradasi ligan, enzim *olysis*, *capsule adsorption*, polisakarida ekstraselular dan redoks yang memiliki peran utama dalam pelarutan silikat.

Acidolisis adalah mekanisme utama dan paling banyak digunakan untuk melapisi mineral silikat. Banyak bakteri di dalam tanah mampu melarutkan bentuk mineral silikat yang tidak tersedia seperti kuarsa dengan mengeluarkan asam organik, yang secara langsung melarutkan ion silikon potasium atau ion khelat untuk membawa K dan Si ke dalam larutan. Diduga bahwa reaksi yang bertanggung jawab atas pelarutan K dan Si yang disebabkan oleh bakteri dapat melibatkan kombinasi serangan proton dan reaksi kompleksasi oleh asam organik. Asam organik yang dianalisis dalam penelitian Santi dan Goenadi (2017) ini adalah asam organik utama yang berperan penting dalam melarutkan mekanisme silikat. Beberapa mekanisme utama telah ditemukan terlibat dalam pelarutan silikat yang dirangkum oleh Vasanthi *et al.* (2016), diantaranya (1) hidrasi dari respirasi CO₂ mikrob tanah dapat membentuk asam karbonat yang mempengaruhi silikat seperti pada degradasi ortoklas terhadap kaolinit. Dilaporkan juga bahwa sequestrasi CO₂ di akuifer basaltik dan asosiasi mineralisasi karbonat dapat mempertahankan lingkungan yang sesuai untuk pelarutan mineral silikat. (2) metabolit yang diekskresikan secara mikrobiologi seperti asam amino, senyawa fenolik, asam organik dan anorganik memiliki sifat pengompleks logam yang dapat mengikat dengan Al dan Fe silikat menyebabkan pelarutan silika.

Nitrobacter dapat menghasilkan asam anorganik yang dapat bertindak pada silikat. Asam organik dan anorganik tidak dapat hanya mendorong kondisi asam untuk mendorong pelarutan silika tetapi juga memberikan proton (H⁺) untuk protonasi terkait hidrolisis silikat dan di sisi lain mengompleks dengan komponen kationik silikat (khelasi) karena merupakan agen pengelat potensial. Asam oksalat yang diuraikan oleh bakteri dapat bereaksi dengan Al dan Fe untuk membentuk oksalat kompleks dari mineral. Pelarutan silikat karena produksi asam keto-glukonat oleh bakteri yang membentuk kompleks dan khelat dengan logam juga dilaporkan, serta (3) pembentukan kompleks permukaan oleh molekul organik dan ligan yang mendorong pelarutan silika juga dapat terjadi. Biosilika ini selain dapat meningkatkan ketersediaan Si pada tanah-tanah di Indonesia, juga integrasinya terhadap perkebunan kelapa sawit pada tanah sulfat masam dapat mereduksi permasalahan aluminium. Sumberdaya deposit kuarsa di Indonesia harus dikembangkan secara terintegrasi dengan lembaga riset untuk analisis penelitian kedepannya.

Pemanfaatan mikrob pelarut silika harus terus dikembangkan untuk mendapatkan hasil yang terbaik. Riset eksplorasi bakteri pelarut silika yang lain juga perlu dilakukan untuk mendapatkan strain unggul yang saat ini kemungkinan belum diperoleh. Sosialisasi pemanfaatan tandan kosong kelapa sawit juga harus terus dilakukan sebagai bagian integral penyediaan Si kembali ke dalam tanah. Makin tersedia Si dapat dimanfaatkan (Si tersedia), potensi toksisitas terhadap logam berat juga dapat direduksi. Potensi ganda biosilika ini tidak hanya untuk bioameliiorasi melainkan untuk bioremediasi lahan-lahan pertanian dan perkebunan di Indonesia. Kedepan diharapkan dapat terjadi sinergi positif antara stakeholder (pihak perkebunan ataupun pertambangan deposit mineral kuarsa) dengan pemerintah untuk pemanfaatan biosilika secara luas.

KESIMPULAN

Inovasi teknologi penyediaan Si dari mineral-mineral mengandung Si ataupun dari sumber organik (tandan kosong kelapa sawit) secara kontinue perlu dilakukan. Hal tersebut secara signifikan dapat dilakukan dengan pemanfaatan mikroorganisme bakteri pelarut silika. Pemberian Si dalam tanah ini dapat memperbaiki sifat kimia tanah untuk mereduksi toksisitas aluminium dan logam berat lain pada tanah sulfat masam, sehingga budidaya kelapa sawit pada lahan tersebut tidak mengalami kendala pertumbuhan. Peranan Si pada tanaman kelapa sawit secara positif mempengaruhi ekofisiologi tanaman dan perolehan hasil panen. Integrasi dan sinergi positif perlu diupayakan untuk mengembangkan biosilika di Indonesia untuk pengarusutamaan bioremediasi dan mendorong produktivitas berbagai komoditas, khususnya kelapa sawit pada lahan sulfat masam. Pemberian silika tidak larut ditambah dengan inokulasi bakteri pelarut silika mampu meningkatkan kelarutan Si tersedia dalam tanah. Peningkatan performa dari konsorsium bakteri pelarut silika perlu diteliti lebih lanjut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Pusat Penelitian Bioteknologi dan Bioindustri Indonesia (PPBBI) PT Riset Perkebunan Nusantara serta bantuan dana riset dari BPDPKS (Contract No. PRJ - 52 /DPKS/2016) untuk riset pengembangan biosilika.

DAFTAR PUSTAKA

- Adrees, M., Shafaqat, A., Muhammad, R., Muhammad, Z.R., Muhammad, I., Farhat, A., Mujahid, F., Muhammad, F.Q., Muhammad, K.I. 2015. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: A review. *Ecotoxicol Environ Saf.* 119: 186-197.
- Alwi, M. 2011. Inaktivasi pirit dan jarosit terlapuk melalui pelindian dan penggunaan biofilter di tanah sulfat masam [Disertasi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Avakyan, Z.A. 1985. Microflora of rock and its role in the leaching of silicate minerals. *Biogeotechnology of Metals*. Centre of Internal Projects GKNT, Moscow. Pp. 175–194.
- Camenzuli, D., Damian, B.G. 2013. Immobilization and encapsulation of contaminants using silica treatments: A Review. *Remediation*. 24: 49-67.
- Castro, I.M, Fietto, J.L.R., Vieira, R.X, Tro´pia, M.J.M., Campos, L.M.M., Paniago, E.B., Brand˜ao, R.L. 2000. Bioleaching of zinc and nickel from silicates using *Aspergillus niger* cultures. *Hydrometallurgy* 57: 39-49.
- Datnoff, L.E., Snyder, G.H., Korndörfer, G.H. 2001. Silicon in agriculture. *Elsevier*. 8: 1-403.
- Dobermann, A., Fairhurst, T. 2000. *Rice: Nutrient disorders and nutrient management*, IRRI, Los Banos.
- Elisa, A.A., 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.
- Essington, M.E. 2005. *Soil and Water Chemistry: An Integrative Approach*. CRC Press.
- Firmansyah, M.A. 2014. Karakterisasi, Kesesuaian Lahan dan Teknologi Kelapa Sawit Rakyat di Rawa Pasang Surut Kalimantan Tengah. *Jurnal Penelitian Pertanian Terapan*. 14(2): 97-105.

Editor: Siti Herlinda et. al.
ISBN: 978-979-587-748-6

- Haynes, R.J. 2014. A contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. *J. Plant Nutr Soil Sci.* 1: 1-14.
- Imtiaz, M., Muhammad, S.R., Muhammad, A.M., Muhammad, A., Sher, M.S., Balal, Y., Dawood, A.S., Muhammad, R., Muhammad, A.N., Sajid, M., Shuxin, T. 2016. Silicon occurrence, uptake, transport and mechanisms of heavy metals, minerals and salinity enhanced tolerance in plants with future prospects: A review. *J Environ Manage.* 183: 521-529.
- Korndörfer, G.H., Snyder, G.H., Ulloa, M. 2001. Calibration of soil and plant silicon analysis for rice production. *J Plant Nutr.* 24:1071-1084.
- Mbhele, P.P. 2007. Remediation of soil and water contaminated by heavy metals and hydrocarbons using silica encapsulation [Disertasi]. Witwatersrand: University of Witwatersrand.
- Omar, F.N., Mohammed, M.A.P., Baharuddin, A.S. 2014. Microstructure modelling of silica bodies from oil palm empty fruit bunch (OPEFB) fibers. *BioRes.* 9(1): 938-951.
- Ratnasari, S. 2016. tanggapan fisiologis dan pertumbuhan kelapa sawit (*Elaeis Guineensis Jacq.*) keracunan aluminium terhadap pemberian silika [Tesis]. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Santi, L.P., Goenadi, D.H. 2013. Uji potensi *Burkholderia cenocepacia* strain KTG sebagai bahan aktif pembenah hayati pada tanah tekstur berpasir di Kalimantan Tengah. *Menara Perkebunan.* 81(1): 28-34.
- Santi, L.P., Goenadi, D.H. 2017. Solubilization of silicate from quartz mineral by potential silicate solubilizing bacteria. *Menara Perkebunan* (85: 2).
- Santi, L.P., Mulyanto, D., Goenadi D.H. 2017. Double acid-base extraction of silicic acid from quartz sand. *JMMCE* (inpress).
- Shamshuddin, J., Auxtero, E.A. 1991. Soil solution composition and mineralogy of some active acid sulfate soils in Malaysia as affected by laboratory incubation with lime. *Soil sci.* 152: 365-376.
- Shamshuddin, J., Elisa, A.A., Shazana, M.A.R.S, Fauziah, C.I., Panhwar, Q.A., Naher, U.A. 2014. Properties and Management of Acid Sulfate Soils in Southeast Asia for Sustainable Cultivation of Rice, Oil Palm, and Cocoa. *Adv Agron.* 124: 91-137
- Shamshuddin, J. 2006. *Acid Sulfate Soil in Malaysia*. Serdang: UPM Press.
- Sheng, X.F., Zhao, F., He, L.Y., Qiu, G., Chen, L. 2008. Isolation and characterization of silicate mineral solubilizing *Bacillus globisporus* Q12 from the surface of weathered feldspar. *Can J Microbiol.* 54: 1064-1068.
- Singh, S., Durgesh, K.T., Swati, S., Shivesh, S., Nawal, K.D., Devendra, K.C., Marek, V. 2017. Toxicity of aluminium on various levels of plant cells and organism: a review. *Environ Exper Bot.* 1: 1-63.
- Sitinjak, M.A. 2017. Isolasi dan uji potensi mikroba pereduksi sulfat dari berbagai sumber terhadap perubahan media tumbuh di laboratorium [Skripsi]. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Suastika, I.W., Wiwik, H., Subiksa, I.G.M. 2014. Karakteristik dan Teknologi Pengelolaan Lahan Sulfat Masam Mendukung Pertanian Ramah Lingkungan. [Internet]. Jakarta (ID): Badan Litbang Pertanian. hlm 95-120; [diunduh 16 September 2017]. Tersedia pada: http://balittanah.litbang.pertanian.go.id/ind/dokumentasi/buku/buku%20ekosistem%20ramah%20lingkungan/05karakteristik_swastika.pdf.
- Subagyono, K., Susanti, E. 1998. Sistem Aliran Satu Arah sebagai Alternatif Strategi Pengelolaan Air di Lahan Pasang Surut. Prosiding Seminar Nasional dan Editor: Siti Herlinda et. al.
ISBN: 978-979-587-748-6

- Pertemuan Tahunan Komisariat Daerah Himpunan Ilmu Tanah Indonesia, p 347-354.
- Sumawinata, B., Dwi, P.T.B. 2009. Abstrak Penelitian Pengembangan Teknik Pengelolaan Tanah dan Air pada Lahan Sulfat Masam untuk Budidaya Padi. http://web.ipb.ac.id/~lppm/lppmipb/penelitian/hasilcari.php?status=buka&id_haslit=HB/020.09/SUM/p [Diakses 15 September 2017].
- Susanti, N. 2008. Efektivitas Bahan Amelioran dalam Menekan Kelarutan Aluminium pada Air dan Tanah Sulfat Masam. [Skripsi] Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Vasanthi, N., Saleena, L.M., Raj, S.A. 2016. Silica Solubilization Potential of Certain Bacterial Species in the Presence of Different Silicate Minerals. *Springer Netherlands*. <https://doi.org/10.1007/s12633-016-9438-4>
- Winarna, Santoso, H., Yusuf, M.A., Sumaryanto, Sutarta, E.S. 2014. Pertumbuhan Tanaman Kelapa Sawit di Lahan Pasang Surut. Prosiding Seminar Nasional Lahan Suboptimal 2014, Palembang 26-27 September 2014.