

PENGELOLAAN TERPADU INOVASI KESUBURAN LAHAN RAWA PASANG SURUT SULFAT MASAM TERDEGRADASI

Mukhlis dan Wahida Annisa

Sejak 20 tahun terakhir, masalah serius yang dihadapi dalam sistem produksi tanaman pangan terutama padi antara lain pelandaian peningkatan produktivitas (*levelling off*) pada lahan subur, masih rendahnya produktivitas lahan-lahan suboptimal, dan alih fungsi lahan sawah beririgasi teknis yang produktivitasnya tinggi ke lahan non pertanian. Oleh karena itu, untuk mendukung peningkatan produksi pangan nasional ditempuh melalui program intensifikasi dan ekstensifikasi ke lahan suboptimal terutama lahan rawa. Pada tahun 2018, ekstensifikasi dilakukan melalui program Perluasan Areal Tanam Baru (PATB) di lahan rawa seluas 1 juta ha. Disamping itu, juga dilakukan program #SERASI (Selamatkan Rawa Sejahterakan Rakyat) seluas 500.000 ha di beberapa provinsi yang mempunyai lahan rawa baik pasang surut maupun lebak cukup luas dan bertujuan untuk meningkatkan Indeks Pertanaman dan produktivitas padi.

Masalah yang dominan dalam pengembangan lahan rawa terutama rawa pasang surut adalah terdapatnya lahan sulfat masam potensial dan aktual yang luasnya masing-masing mencapai 4,34 juta ha dan 2,37 juta ha (Ritung *et al.*, 2011). Luasan lahan sulfat masam ini semakin bertambah seiring dengan terjadinya degradasi lahan gambut yang memiliki lapisan bahan sulfidik di bawahnya. Pengalaman menunjukkan bahwa pembukaan lahan sulfat masam selalu dibarengi dengan pembuatan saluran air untuk kepentingan transportasi dan drainase atau irigasi pada kawasan tersebut. Namun pada kenyataannya, pengelolaan air tidak dapat terkendali dengan baik, sehingga permukaan air tanah turun di bawah permukaan lapisan pirit terutama pada musim kemarau. Hal ini mengakibatkan senyawa pirit teroksidasi yang menghasilkan asam sulfat yang membuat pH tanah menjadi sangat rendah. Kemasaman yang tinggi tersebut berdampak negatif terhadap sifat kimia dan aktivitas mikroba tanah (van Breemen 1993). Permasalahan yang timbul akibat proses pemasaman tersebut adalah apabila senyawa atau unsur yang beracun tidak terbuang dari lingkungan perakaran, maka pertumbuhan tanaman terhambat.

Sampai sekarang, tanaman padi merupakan komoditas paling luas dibudidayakan di lahan rawa pasang surut sulfat masam. Meskipun demikian, produktivitasnya sangat beragam dan sangat tergantung pada kondisi tanah, tata air dan penerapan teknologi terutama pengelolaan lahan dan varietas tanaman. Berdasarkan tipologi lahan, produktivitas padi sawah eksisting di lahan sulfat masam potensial berkisar antara 3,2 – 4,0 t GKG/ha dan di lahan sulfat masam aktual berkisar 2,6 – 3,5 t GKG/ha. Melalui optimalisasi lahan, potensi produktivitas

padi masing-masing tipologi lahan berkisar 6,3 – 7,0 t GKG/ha pada lahan sulfat masam potensial dan 4,5 – 6,0 t GKG/ha pada lahan sulfat masam aktual (BBSDLP 2011). Kondisi tersebut, umumnya disebabkan petani masih mengandalkan masukan teknologi yang tradisional, sehingga potensi lahan yang ada belum dapat memberikan hasil yang optimal. Dalam hal penggunaan pupuk, petani belum menerapkan pemupukan berimbang karena berbagai hal, antara lain mahalnya harga atau kelangkaan pupuk tertentu seperti KCl dan SP-36. Sebagian besar petani padi di lahan rawa hanya menggunakan pupuk Urea sebagai sumber hara N karena harganya lebih murah dan pengaruhnya bisa langsung dilihat pada pertumbuhan vegetatif tanaman, sedangkan pupuk P dan K tidak banyak digunakan karena mahalnya harga atau kelangkaan pupuk SP-36 dan KCl (Mukhlis et al. 2009). Menurut Saraswati (2007) bahwa penggunaan pupuk anorganik yang terus menerus telah meningkatkan konsentrasi garam dalam larutan tanah sehingga menyebabkan ketidakseimbangan hara tanah. Sedangkan Las *et al.* (2006) menyatakan bahwa ketergantungan yang besar terhadap pupuk anorganik sebagai sumber hara berpotensi menimbulkan efek negatif terhadap sumberdaya lahan, air, dan lingkungan.

Sesuai dengan sifatnya yang suboptimal, dan selaras dengan konsep dan tuntutan pembangunan pertanian berkelanjutan, maka pengembangan dan optimalisasi lahan rawa pasang surut sulfat masam seharusnya diarahkan pada beberapa aspek, yaitu produktivitas, efisiensi produksi, kelestarian sumberdaya dan lingkungan serta kesejahteraan petani. Untuk mencapai hal tersebut maka semua faktor pertumbuhan dan perkembangan tanaman harus dalam kondisi ideal dan dikelola dengan baik. Khusus berkaitan dengan kesuburan tanah harus dikelola intensif diantaranya melalui pengelolaan terpadu inovasi kesuburan lahan rawa pasang surut sulfat masam.

Tulisan ini mengemukakan pentingnya pengelolaan terpadu inovasi kesuburan untuk meningkatkan produktivitas lahan pasang surut sulfat masam terdegradasi.

DEGRADASI LAHAN SULFAT MASAM

Pengembangan lahan rawa pasang surut dilaksanakan pemerintah sejak tahun 1970, berupa pembangunan sistem drainase terbuka berdimensi besar. Pada mulanya lahan ini menunjukkan produksi padi di sawah yang cukup tinggi, namun dalam perkembangan selanjutnya sistem drainase yang sudah ada tidak segera diikuti dengan pembuatan pintu pengatur air, sehingga degradasi lahan mulai berjalan. Terjadinya drainase berlebihan, tidak hanya membawa toksik tetapi juga membawa hara dan mineral lainnya. Pengolahan tanah yang terlalu dalam dan

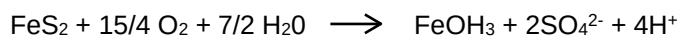
intensif juga dapat menyebabkan tereksposnya pirit ke lapisan permukaan tanah, sehingga terjadi proses oksidasi pirit yang menyebabkan tanah menjadi sangat masam. Akhirnya lahan menjadi bongkor dan ditinggalkan petani, karena sawahnya memberikan hasil sangat rendah atau sama sekali tidak menghasilkan. Selain lahan tidak produktif, atau sistem tata air tidak mendukung, ada beberapa petani yang meninggalkan lahannya, karena hasil produksi pertaniannya tidak mendatangkan keuntungan yang cukup. Menurut Maria *et al.* (2012) proses oksidasi pirit akan menyebabkan: (a) peningkatan nilai potensial redok (Eh) tanah dan kemasaman tanah serta air, (b) kelarutan aluminium (Al^{3+}), sulfat (SO_4^{2-}), hidrogen (H^+) dan besi II (Fe^{2+}) meningkat, (c) ketersediaan (fosfor) P menurun akibat terbentuknya aluminium-fosfat yang tidak larut, (d) kadar basa-basa tertukar menurun, (e) terjadi defisiensi hara, dan (f) pencemaran lingkungan pertanian di sekitarnya.

Reklamasi lahan dengan pembuatan saluran drainase akan merubah kondisi alami yang reduktif ke oksidatif. Kondisi tersebut memungkinkan terjadinya oksidasi pirit yang kemudian menghasilkan senyawa asam sulfat yang sangat masam. Pemasaman akibat oksidasi pirit menjadi kendala utama dalam pengelolaan lahan pasang surut sulfat masam. Pada kondisi tergenang keracunan Fe lebih sering terjadi dibandingkan keracunan Al (Dobermann dan Faihurst 2000). Hal ini disebabkan karena pada keadaan tergenang Al^{3+} mempunyai hubungan erat dengan proses reduksi Fe^{3+} . Ion OH^- yang dilepaskan dalam proses reduksi akan bereaksi dengan Al terlarut menjadi Al hidroksida yang sukar larut, sehingga tanah sawah jarang mengalami keracunan Al kecuali bila proses reduksi berlangsung lambat.

Kekahatan hara pada tanah di lahan sulfat masam umumnya disebabkan oleh rendahnya pH larutan tanah, sehingga lingkungan menjadi masam. Hal tersebut mengakibatkan terganggunya transformasi unsur hara seperti hara N dan P dari bentuk organik menjadi bentuk inorganik, selain itu juga penyematan N bebas secara simbiotik maupun non simbiotik terganggu. Hal ini disebabkan karena pergantian populasi mikroorganisme, begitu kemasaman tanah meningkat. Kekahatan P terutama disebabkan karena tersematnya P pada fraksi Al dan Fe terlarut dalam suasana masam. Dalam keadaan reduktif bentuk P dalam ikatan Fe-P mungkin juga Al-P lepas, menjadi bentuk tersedia setelah penggenangan bertahap. Banyaknya kendala-kendala kimia yang dihadapi pada tanah di lahan sulfat masam mengakibatkan produktivitas tanah menjadi rendah. Andersen *et al.* (2013) menyatakan bahwa kemasaman tanah yang tinggi setelah reklamasi mengimbas terhadap peningkatan kelarutan unsur-unsur meracun seperti: Al, Fe dan Mn. Peningkatan kelarutan unsur meracun tersebut diiringi dengan kahat hara makro (P, Ca, Mg, K) dan hara mikro (Cu dan Zn) (Notohadiprawiro 2000).

Bahan sulfidik tanah sulfat masam yang mengalami oksidasi hingga kondisi Eh + 400 mV akan menyebabkan pirit teroksidasi dan menghasilkan ion-ion Fe^{3+} , Al^{3+} , H^+ dan SO_4^{2-} . Menurut Sudjianto *et al.* (2011) pada tahap awal, oksigen larut lambat bereaksi dengan pirit menghasilkan empat molekul H^+ untuk setiap molekul pirit yang teroksidasi. Jika pH mengalami penurunan hingga di bawah 4, maka kecepatan oksidasi pirit akan berjalan lebih cepat. Pada reaksi ini setiap molekul pirit yang teroksidasi menghasilkan 16 molekul H^+ . Sulfat yang dihasilkan dari oksidasi pirit sangat sedikit dijerap oleh permukaan koloid tanah, sebagian besar hilang bersama air drainase atau terdifusi ke lapisan bawah yang kemudian direduksi kembali menjadi sulfida. Ion H^+ yang dihasilkan dari oksidasi pirit dapat menyebabkan tanah menjadi sangat masam. Enio *et al.* (2011) menyatakan bahwa di lapang pH 3,2 hingga 3,8 dapat menyebabkan hancurnya kisi-kisi mineral liat sehingga silikat dan Al^{3+} terlepas. Aktivitas Al^{3+} berkorelasi dengan pH, bila pH meningkat maka Al^{3+} akan diendapkan sebagai hidroksida. Sekali pirit teroksidasi, oksigen akan masuk ke dalam tanah dan pirit bereaksi dengan oksigen. Inilah awal rusaknya lahan rawa pasang surut sulfat masam akibatnya kemasaman tanah dan air yang meningkat dan munculnya unsur-unsur yang bersifat racun ke lingkungan perairan. Kandungan besi (Fe^{2+}), aluminium (Al^{3+}), ion hidrogen (H^+), dan sulfat (SO_4^{2-}) pada lahan yang didrainase lebih tinggi dibandingkan yang tidak didrainase (Claff *et al.* 2010). Hal ini memberikan implikasi bahwa setelah lahan direklamasi dengan membangun sistem dan jaringan drainase akan mengakibatkan turunnya kualitas lingkungan tanah dan air.

Proses utama yang terjadi bila tanah di lahan rawa teroksidasi adalah oksidasi pirit yang berkaitan dengan kadar aluminium. Kelarutan aluminium akan meningkat drastis pada kondisi yang sangat masam ($\text{pH} < 4$). Peningkatan kadar Al^{3+} beberapa kali lipat setiap penurunan satu unit pH. Kadar Al yang cukup rendah berkisar antara 1-2 mg kg^{-1} sudah dapat meracuni tanaman. Keracunan Al akan menghambat pertumbuhan akar, akar akan menebal, tidak dapat memanjang dan tidak bercabang normal. Besi (Fe) yang sering menimbulkan masalah dalam bentuk *ferro* (Fe^{2+}) yang menyebabkan keracunan bagi tanaman, khususnya dalam kondisi tergenang (Noor 2004). Hal ini disebabkan karena beberapa minggu setelah tergenang, konsentrasi Fe^{2+} pada tanah sulfat masam meningkat karena reduksi senyawa *ferri* (Fe^{3+}) menjadi *ferro* (Fe^{2+}) oleh bakteri *Thiobacillus* sebagai akibat dari over drainage yang ditunjukkan dengan persamaan sebagai berikut:



Menurut Clarkson & Peters (2010) oksidasi pirit akan menghasilkan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (s), SO_4^{2-} (aq), dan H^+ (aq). Oksidasi pirit secara kimia berlangsung lambat, tetapi reaksi yang dimediasi oleh bakteri pengoksidasi besi, khususnya *Thiobacillus ferrooxidans* menjadikan kondisi optimum untuk oksidasi pirit dengan konsentrasi oksigen 1%,

temperatur (30°C), dan pH (3,2). Sedangkan proses reduksi pada tanah sulfat masam akan menghasilkan $\text{Fe}^{2+}_{(\text{aq})}$ dan $\text{H}_2\text{S}_{(\text{aq}, \text{g})}$. Reduksi besi (Fe III menjadi Fe II) terjadi pada potensial redoks (Eh) -180 mV dan reduksi sulfat (SO_4^{2-} menjadi $\text{H}_2\text{S}_{(\text{aq}, \text{g})}$) terjadi pada Eh -220 mV. Keberadaan mineral pirit pada kondisi oksidasi kuat (Eh lebih besar dari + 400 mV) dapat menyebabkan tanah menjadi sangat masam (pH < 3,7).

KEBUTUHAN DAN KESEIMBANGAN HARA TANAH

Tanaman untuk dapat tumbuh dan berkembang secara normal memerlukan jenis dan jumlah unsur hara tertentu. Menurut Mengel dan Kirby (1987), tanaman memerlukan 16 unsur hara esensial yang terdiri atas hara makro (C,H,O,N,P,K,S,Ca,Mg) dan mikro (Fe, Mn, Cu, Zn,Mo,B,Cl). Pengertian hara esensial adalah: (1) tanpa hara tersebut tanaman tidak dapat tumbuh normal, (2) hara terlibat langsung dalam proses metabolisme, (3) bila hara kurang, siklus hidup tanaman tidak lengkap dan menunjukkan gejala defisiensi yang spesifik, dan (4) hara esensial tidak dapat digantikan fungsinya oleh hara lain. Setiap hara esensial memiliki peran dan fungsi masing-masing secara spesifik, baik langsung maupun tidak langsung, dalam proses metabolisme tanaman, seperti fotosintesis dan respirasi.

Kebutuhan hara tanaman sangat terkait dengan varietas dan umur tanaman. Varietas unggul padi misalnya memerlukan unsur hara lebih banyak dibandingkan varietas lokal. Varietas unggul mempunyai potensi hasil tinggi dan berumur pendek, sehingga membutuhkan hara tanaman lebih banyak dan kecepatan penyerapannya juga lebih cepat karena umur tanaman lebih pendek dibandingkan varietas lokal. Penggunaan padi hibrida membutuhkan hara yang lebih banyak dibandingkan varietas unggul. Total hara yang diperlukan tanaman padi untuk hasil tinggi (unggul) masing-masing sebesar 135 kg N, 15 kg P, dan 81 kg K/ha selama empat bulan, sehingga kecepatan penyerapan hara N, P, dan K oleh tanaman padi rata-rata 1,1 kg N/ha/hari, 0,12 kg P/ha/hari dan 0,7 kg K/ha/hari, dua kali lebih cepat dibandingkan dengan penyerapan hara padi varietas lokal (Makarim & Suhartatik 2006; Dierolf 2000).

Pengelolaan lahan rawa pasang surut sulfat masam terdegradasi sebagai lahan sawah untuk budidaya tanaman sangat terkait dengan ketersediaan dan keseimbangan hara dalam tanah. Ketersediaan dan keseimbangan hara di lahan rawa pasang surut sulfat masam terdegradasi dihadapkan pada beberapa masalah antara lain : (1) kemasaman tanah yang tinggi dapat mempengaruhi keseimbangan reaksi kimia dalam tanah dan ketersediaan unsur hara makro primer (N,P,K), hara makro sekunder (Ca dan Mg) dan unsur hara mikro seperti B menjadi berkurang; (2)

keracunan Al biasanya terjadi pada kondisi tanah aerob disertai dengan kahat P, karena P diikat oleh Al menjadi Al-P yang tidak tersedia bagi tanaman; (3) keracunan Fe^{2+} dan H_2S umumnya terjadi pada kondisi tanah anaerob dan banyak mengandung bahan organik; (3) salinitas yang tinggi akibat intrusi air laut pada musim kemarau menyebabkan penyerapan hara dan air terhambat; (4) pada lahan sulfat masam potensial yang kemasamannya relatif rendah, kahat hara terutama N dan K tetap terjadi akibat adanya pencucian baik oleh luapan pasang maupun oleh curah hujan.

Tanaman pada dasarnya menyerap hara pada rasio tertentu yang definitif. Tanaman akan tumbuh normal apabila kandungan hara esensial berada dalam kondisi cukup dan berimbang sesuai dengan kebutuhannya. Kekurangan atau kelebihan salah satu unsur hara esensial menyebabkan pertumbuhan tanaman tidak normal. Hukum minimum Leibig menyatakan bahwa hasil tanaman ditentukan oleh ketersediaan hara yang paling minimum. Hukum ini menunjukkan bahwa untuk memperbaiki pertumbuhan dan hasil tanaman yang kahat salah satu hara cukup dengan menambahkan hara yang kurang tersebut dan tidak perlu menambah hara yang lain karena tidak akan bermanfaat. Dengan menambah satu unsur yang kurang saja maka kondisi hara dalam tanah telah menjadi berimbang sesuai kebutuhan tanaman, dan cara ini dapat disebut dengan pemupukan berimbang. Penggunaan pupuk yang berlebihan selain tidak efektif juga dapat merugikan bagi tanaman, tanah dan lingkungan serta tidak ekonomis. Menurut Dobermann & Fairhurst (2000) bahwa pengelolaan hara yang tidak berimbang akan menurunkan hasil padi hingga 40% dan apabila disertai dengan pengelolaan tanaman yang tidak baik maka kehilangan hasil padi dapat mencapai 60% dari potensi hasilnya.

PRINSIP PENGELOLAAN TERPADU INOVASI KESUBURAN LAHAN

Tanah merupakan media tumbuh dan tempat berlangsungnya berbagai proses biologis, reaksi biokimia dan aliran energi untuk mendukung pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Jika proses diatas dapat berlangsung dengan baik, maka tanaman tumbuh dengan baik sehingga mampu memproduksi mendekati potensi hasilnya. Organisme tanah dari yang berukuran paling kecil (mikroba) sampai yang berukuran besar (meso dan mega fauna) berinteraksi satu sama lain membentuk suatu jaringan makanan (*food web*) yang mempengaruhi kualitas lahan secara signifikan.

Ekosistem tanah yang sehat dan subur (*healthy soils*) mencerminkan adanya interaksi harmonis, baik antara komponen abiotik dengan biotik, maupun sesama komponen biotik membentuk suatu rangkaian aliran energi. Komponen biotik dari ekosistem dapat dibagi menjadi 3 kelompok: (1) produsen, yaitu organisme (tumbuhan dan mikroba) yang mampu memanfaatkan sinar matahari

sebagai sumber energi dan CO₂ sebagai sumber karbon melalui proses fotosintesis untuk menghasilkan biomassa organik; (2) konsumen, yaitu organisme yang mengkonsumsi senyawa organik untuk memenuhi kebutuhannya; dan (3) dekomposer, yaitu mikroba yang merombak senyawa organik yang sudah mati (tanaman, hewan, limbah organik dari perkotaan maupun industri) untuk mendapatkan energi dan nutrisi melalui proses respirasi atau fermentasi. Melalui proses fermentasi ini dihasilkan energi, berbagai produk antara (metabolit) dan mineral (hara makro dan hara mikro).

Tanah yang sehat akan didominasi organisme tanah yang menguntungkan dan berperan penting dalam dekomposisi bahan organik, daur hara, agregasi, dan memperbaiki struktur tanah serta menghasilkan berbagai fitohormon untuk merangsang pertumbuhan dan regenerasi akar. Penggunaan bahan kimia (pupuk kimia dan pestisida kimia) yang berlebihan dapat menyebabkan terputusnya aliran energi dan keseimbangan ekosistem alami yang menguntungkan tanaman. Akibatnya dalam waktu relatif singkat tanah menjadi lebih tidak produktif. Oleh karena itu, manajemen input dalam budidaya tanaman di lahan rawa pasang surut sulfat masam terdegradasi diarahkan untuk memperbaiki kimia, fisik, dan biologi tanah.

Konsep dasar pengelolaan terpadu inovasi kesuburan lahan adalah melakukan pemupukan sesuai yang diperlukan tanaman baik dalam jumlah maupun komposisi yang tepat untuk mencapai tingkat hasil yang diinginkan. Pola pemupukan yang diterapkan adalah terpadu, yaitu menggunakan perpaduan pupuk organik, pupuk hayati, dan pupuk anorganik (kimia). Dalam konteks ini, pemupukan berimbang mencakup hara makro, mikro, dan pupuk organik. Kombinasi antara pupuk anorganik, pupuk organik, dan pupuk hayati secara terintegrasi dan berimbang akan saling mendukung terhadap kesehatan tanah, kualitas tanah, produktivitas tanah dan tanaman secara berkelanjutan. Pupuk anorganik berfungsi sebagai nutrisi tanaman, pupuk organik sebagai pembenah tanah dan pupuk hayati sangat berguna sekali untuk dekomposer dan nutrisi tanaman karena mengandung mikroorganisme yang berfungsi sangat luar biasa.

Efektivitas pemupukan dapat ditingkatkan dengan memperhitungkan sifat asli tanah dan faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhinya seperti pemanfaatan bahan organik *insitu*, dinamika hidrologi lahan yang berpotensi menjadi sumber hara atau sebaliknya berperan sebagai agen pelindi hara. Secara umum konsep di atas dapat dikategorikan sebagai “konsep pemupukan spesifik lokasi”, yang memperhitungkan segala sumberdaya alam yang terdapat disekitar lahan dan kebutuhan tanaman akan unsur hara. Konsep pemupukan demikian dilakukan dengan pendekatan terhadap target hasil, yaitu pemberian pupuk dengan mengacu pada keseimbangan hara yang diperlukan tanaman berdasarkan target

hasil yang ingin dicapai dan kemampuan tanah menyediakan hara tersebut (Alwi & Fahmi 2016).

Kebutuhan tanaman akan tambahan hara melalui pupuk dihitung dari selisih antara kebutuhan hara total tanaman untuk mencapai hasil tinggi yang diharapkan dikurangi dengan kemampuan penyediaan hara dari sumber alami yang berasal dari tanah, sisa tanaman, pupuk hijau, dan sebagainya (Dobermann *et al.*, 2004). Semakin tinggi hasil yang diharapkan, semakin tinggi pula kebutuhan hara. Semakin tinggi penyediaan hara dari sumber alami di dalam tanah, semakin rendah tambahan hara dari pupuk yang harus ditambahkan. Jenis dan jumlah hara yang ditambahkan dari pupuk bergantung pada keberadaan, jumlah, dan keseimbangan hara dari sumber alami di tanah tersebut. Saat ini telah tersedia *Decision Support System* (DSS) pemupukan padi lahan rawa yang ramah pengguna dan dapat diakses melalui website Balittra dan Perangkat Uji Tanah Rawa (PUTR). Perbaikan hasil tanaman padi yang diperoleh dari perlakuan dosis pupuk berdasarkan DSS dan PUTR ini didukung oleh perbaikan sifat kimia tanah seperti kadar hara dan kemasaman tanah maupun sifat tanah lainnya seperti kadar Fe, Al dan potensial redoks tanah (Alwi & Fahmi 2016).

INOVASI KESUBURAN LAHAN SULFAT MASAM TERDEGRADASI

Ameliorasi

Bahan organik sebagai amelioran memiliki pengaruh penting dalam menciptakan kesuburan tanah, baik secara fisika, kimia maupun dari segi biologi tanah. Bahan organik adalah bahan pementap agregat yang sangat baik. Disamping itu, sekitar lebih dari setengah kapasitas tukar kation (KTK) berasal dari bahan organik; merupakan sumber hara tanaman; dan sumber anergi dari sebagian besar organisme tanah. Oleh karena itu bahan organik merupakan indikator kunci bagi kualitas tanah, dan kualitas lingkungan. Dalam memainkan peranan tersebut bahan organik sangat ditentukan oleh sumber dan susunannya, kelancaran dekomposisinya, serta hasil dekomposisi itu sendiri. Pemberian bahan organik dalam jangka panjang tidak saja mampu mempertahankan lahan dari proses degradasi, tetapi juga memperbaiki kualitasnya.

Jerami padi merupakan salah satu sumber utama bahan organik pada tanah sawah di lahan sulfat masam. Pemberian jerami padi dapat berdampak positif atau negatif bagi pertumbuhan tanaman padi. Hal tersebut sangat tergantung pada cara pengelolaannya, kualitas dan kuantitas bahan organik tersebut. Jerami padi dapat menjadi salah satu sumber unsur hara utama di tanah sulfat masam karena mengandung 0,6 % N, 0,1 % P dan S, 1,5 % K, 5 % Si, dan 40 % C (Ponnamperuma

1984), serta mengandung unsur mikro seperti Zn, Si maupun Fe bagi tanaman padi (Dobermann & Fairhurst 2000). Aplikasi atau pengembalian bahan organik secara terus menerus dalam jangka waktu yang lama mampu mengurangi percepatan kerusakan lahan. Jerami padi yang diberikan ke lahan harus dalam kondisi yang sudah relatif terdekomposisi (dikomposkan sebelumnya), karena pada kondisi tersebut jerami padi sudah dapat menjadi sumber hara dan memiliki pengaruh reduksi yang lebih kecil, sebaliknya pada kondisi tersebut bahan organik jerami telah memiliki kemampuan khelasi terhadap Fe yang lebih tinggi. Walaupun Nett *et al.* (2011) menyimpulkan bahwa pengaruh yang kecil dari ameliorasi organik secara terus menerus ke lahan terhadap laju mineralisasi dan menurutnya tidak relevan jika dikaitkan dengan upaya efisiensi pemupukan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian jerami sisa panen, ataupun pemberian campuran jerami dan pupuk kandang mampu meningkatkan hasil padi (Bhattacharyya *et al.*, 2012). Meningkatnya hasil padi akibat upaya pengelolaan jerami padi yang tepat sebenarnya disebabkan oleh meningkatnya kualitas tanah melalui peningkatan ketersediaan hara dan membaiknya lingkungan fisik tumbuh tanaman. Berdasarkan jumlahnya, maka jerami padi yang diberikan haruslah efektif karena jumlah berlebih tidak akan memberikan dampak yang nyata terhadap peningkatan output produksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian 5 t/ha jerami yang berasal sisa panen sebelumnya memberikan hasil yang tidak berbeda dibandingkan perlakuan dengan dosis yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa pengembalian residu jerami sisa panen sekitar 5 t/ha hasil dari pertanaman sebelumnya telah cukup untuk memperbaiki kondisi pertumbuhan tanaman padi. (Jumberi *et al.*, 2007).

Penggunaan bahan organik dalam ameliorasi lahan sulfat masam juga dapat menurunkan gejala keracunan besi pada tanaman. Hal ini disebabkan kemampuan bahan organik dalam mengikat logam Fe dalam bentuk yang tidak dapat diserap oleh tanaman. Menurut Jumberi & Alihamsyah (2004) pemberian kompos jerami dapat mengurangi kadar besi dan sulfat serta meningkatkan hasil padi di lahan pasang surut sulfat masam. Bahan organik selain sebagai sumber hara juga meningkatkan daya pegang tanah terhadap pupuk yang diberikan, sehingga meningkatkan efisiensi pemupukan.

Penggunaan Pupuk Anorganik

Pemupukan anorganik memegang peranan penting dalam rangka meningkatkan kualitas dan produktivitas lahan sulfat masam terdegradasi, mengingat kondisi lahannya yang masam dengan tingkat kesuburan tanah alami rendah. Tanaman yang ditanam di lahan tersebut sangat tanggap terhadap pemupukan N, P, dan K. Oleh karena itu, pemupukan pupuk anorganik seperti Urea, SP36, dan KCl harus diberikan. Hasil-hasil penelitian pemupukan di lahan sulfat masam telah menemukan dosis-dosis anjuran untuk beberapa komoditas sesuai

dengan tipologi lahannya. Untuk tanaman padi pada lahan sulfat masam adalah 67,5-135 kg N/ha, 45-70 kg P₂O₅/ha, dan 50-75 kg K₂O/ha. Untuk tanaman jagung secara umum yang dianjurkan adalah: 90 kg N/ha, 45-90 kg P₂O₅/ha, 50 kg K₂O/ha. Pemupukan untuk tanaman kedelai dan kacang hijau yang dianjurkan adalah 22,5 kg N/ha, 45 kg P₂O₅/ha, dan 50 kg K₂O/ha, sedangkan untuk kacang tanah adalah 22,5 kg N/ha, 60 kg P₂O₅/ha, dan 50 kg K₂O/ha. Namun untuk tanaman kedelai perlu ditambahkan Rhizobium (legin/nitrigen) sebanyak 15 g/kg benih. Untuk tanaman sayuran diperlukan bahan amelioran sebelum dilakukan pemupukan seperti kapur, dolomit, dan kompos. Takaran bahan amelioran dan pupuk sangat bervariasi tergantung jenis tanaman sayuran yang ditanam (Balittra 2011).

Penggunaan Pupuk Organik

Pupuk organik mempunyai peranan penting sebagai bahan penyubur tanah baik secara langsung sebagai pemasok hara maupun sebagai sumber energi bagi fauna dan mikroba tanah serta memperbaiki sifat-sifat fisik tanah. Pupuk organik juga dapat berfungsi mempertahankan suasana reduktif dan menekan oksidasi pirit di lahan sulfat masam terdegradasi. Proses reduksi ditentukan oleh bahan organik tanah sebagai sumber proton. Kadar bahan organik mempunyai korelasi positif dengan produktivitas tanah (Prihatini *et al.*, 1996). Di lahan sulfat masam terdegradasi bahan organik berfungsi untuk mempertahankan kondisi reduksi tanah karena bahan organik merupakan substrat bagi mikroorganisme tanah dalam mereduksi besi ferri menjadi besi ferro, sehingga oksidasi pirit dapat ditekan. Siklus bahan organik merupakan proses yang sangat penting bagi dinamika dan keseimbangan hara yang diperlukan tanaman yang dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu: kondisi iklim, jenis tanah, jenis tanaman pangan dan pengelolaannya. Oleh karena itu pengelolaan bahan organik tanah dengan pengembalian sisa panen ataupun penambahan pupuk organik berupa kotoran ternak maupun kompos tanaman dapat meningkatkan dan mempertahankan produktivitas lahan.

Pada tanah tergenang, pupuk organik berperan tidak hanya sebagai sumber hara bagi tanaman tetapi juga merupakan substrat bagi mikroorganisme anaerob. Annisa & Nursyamsi (2016) mengatakan bahwa bahan organik memiliki fungsi untuk mempertahankan kondisi reduktif dan untuk mengkelat unsur-unsur beracun dalam tanah asam sulfat yang diperkuat dengan hasil penelitian yang menunjukkan ada korelasi negatif antara nilai Eh dengan konsentrasi Fe dengan nilai korelasi $r = -0.856$ (Annisa 2014). Baldwin dan Fraser (2009); Dear *et al.* (2002); Fitzpatrick *et al.* (2009) mengatakan bahwa bahan organik dapat menstimulasi bakteri pereduksi sulfat atau memperlambat oksidasi pirit. Sumber bahan organik ada dua yaitu sumber bahan organik primer berupa jaringan organik tanaman seperti: daun, ranting, cabang, buah, dan akar dan sumber bahan organik sekunder seperti jaringan organik fauna berupa kotoran dan mikrofauna. Di lahan rawa bahan organik yang umum digunakan digunakan oleh petani seperti: jerami padi, gulma lokal/purun (*Eleocharis*

dulcis) dan kotoran sapi. Annisa (2014) melaporkan bahwa karakterisasi dari ketiga jenis bahan organik tersebut ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat kimia beberapa jenis bahan organik

Parameter	Jenis bahan organik					
	J _S	P _S	K _{SS}	K _J	K _P	KK _S
C-org (%)	50,62	47,13	33,13	41,15	41,20	32,93
N-tot (%)	0,546	0,714	0,910	1,456	1,288	1,582
Ratio C/N	92,71	66,01	36,47	28,26	31,99	20,81
P (%)	0,093	0,197	0,114	0,214	0,207	0,590
K (%)	0,899	0,689	0,432	1,390	1,131	0,588
Fe (%)	0,228	1,385	0,278	0,707	3,409	0,549

Sumber: Annisa (2014)

Keterangan: J_S = jerami segar; P_S = purun (*Eleocharis dulcis*) segar; K_S = kotoran sapi segar; K_J = kompos jerami; K_P = kompos purun; KK_S = kompos kotoran sapi.

Pengomposan bahan organik akan meningkatkan kandungan hara seperti P, K, Ca dan Mg tanah. Ada beberapa cara pengomposan antara lain: (1) ditimbun pada permukaan tanah yang telah dipadatkan (*kraal methode*), (2) ditimbun pada galian tanah (50-75 cm), separo di dalam tanah (50-75 cm) dan separo di atas permukaan (*Heat & trench methode*), (3) langsung pada bak penampungan kotoran ternak (*Bengalore methode*), (4) menggunakan kotak pengomposan dari pagar beton yang tertutup (anaerob) selama 18 hari dan seterusnya diberikan aerasi dari lobang-lobang bagian dasar kotak (*Baccari-Italia methode*). Proses pengomposan dapat dipercepat dengan menggunakan bioaktivator perombak bahan organik, seperti bakteri, actomycetes, dan jamur pengurai selulosa yang dapat membantu proses dekomposisi (Husna 2014).

Untuk mengoksidasi bahan organik mikroorganisme menggunakan akseptor elektron yang tersedia. Dilihat dari perbedaan energi akseptor elektron yang digunakan mengikuti urutan: O₂ > NO₃⁻ > Mn⁴⁺ > Fe³⁺ > SO₄²⁻ > CO₂ dan oksidan (elektron akseptor) serta reduktan (elektron donor) membatasi terhadap proses oksidasi reduksi pada tanah tergenang. Apabila elektron akseptor lebih banyak dibanding reduktan maka potensial redoks cenderung meningkat (positif), tetapi apabila reduktan (elektron donor) lebih banyak dibanding oksidan maka potensial redoks cenderung menurun (negatif). Kematangan kompos dapat dilihat dari karakteristik fisik (bau, warna, dan tekstur yang telah menyerupai tanah, penyusutan berat mencapai 60%, pH netral, suhu stabil), perubahan kandungan hara (mencapai rasio C/N 10-20), dan tingkat fitotoksisitas rendah (Sulistyawati 2008).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian bahan organik berasal dari jerami padi dapat meningkatkan ketersediaan unsur hara dalam tanah, meningkatkan hasil padi, dan memperbaiki sifat kimia tanah ditandai dengan menurunnya konsentrasi Al, Fe dan SO₄ (Indrayati & Jumberi 2001). Disamping itu,

pupuk organik juga mengurangi penggunaan pupuk anorganik. Hasil analisa tanah setelah pemberian kompos menunjukkan peningkatan C organik, N-total dan Ca-dd dibandingkan tanpa kompos (Mukhlis *et al.*, 2009).

Gulma yang tumbuh melimpah di lahan rawa dapat dimanfaatkan sebagai sumber unsur hara terutama N, P, dan K setelah dikomposkan. Hasil penelitian menunjukkan pemberian kompos gulma *E. acutangula*, *P. repens*, *R. corymbosa* L sebagai sumber NPK sebanyak 6,0 t/ha dapat meningkatkan kandungan C-organik dari 7,55 menjadi 9,38%, P-tersedia dari 8,80 menjadi 43,41 ppm P dan K-dd dari 0,41 menjadi 0,59 me/100 g dan hasil padi sebesar 3,85 t/ha gabah kering panen pada lahan sulfat masam. Kompos campuran jerami padi dan enceng gondok dengan takaran 2 t/ha dapat meningkatkan hasil padi sebesar 51,93 – 52,79 % (2,33 menjadi 3,54 – 3,58 t/ha) dan 14,89 – 22,22 % (4,50 menjadi 5,17 – 5,50 t/ha) di lahan rawa sulfat masam. Kombinasi jerami padi + enceng gondok yang dikomposkan menggunakan mikroba dekomposer (*M-dec* atau *Trichoderma* sp) dengan takaran 2 t/ha dapat meningkatkan hasil padi sebesar 51,93 – 52,79 % (2,33 menjadi 3,54 – 3,58 t/ha) dan 14,89 – 22,22 % (4,50 menjadi 5,17 – 5,50 t/ha) masing-masing untuk lokasi lahan sulfat masam Desa Karang buah (Kabupaten Batola, Kalimantan Selatan) dan Dadahup (Kabupaten Kapuas, Kalimantan Tengah) (Mukhlis *et al.*, 2009).

Penggunaan Pupuk Hayati

Pupuk hayati adalah inokulan berbahan aktif organisme hidup atau laten dalam bentuk cair atau padat yang memiliki kemampuan untuk memobilisasi, memfasilitasi dan meningkatkan ketersediaan hara dari tidak tersedia menjadi bentuk tersedia melalui proses biologis. Prinsip aplikasi pupuk hayati pada tanah dan tanaman ialah memperbanyak populasi mikroba terpilih sehingga mampu bersaing dengan mikroba asli (*indigenous*). Invasi dan kolonisasi awal dari pupuk hayati yang di introduksi dalam jumlah banyak dan bermutu unggul akan memenangkan kompetisi dengan mikroba asli, sehingga mempunyai kesempatan untuk membantu penyediaan hara dan pertumbuhan tanaman. Penyediaan hara ini berlangsung melalui hubungan simbiotis atau nonsimbiotis. Secara simbiotis berlangsung dengan kelompok tanaman tertentu atau dengan kebanyakan tanaman, sedangkan nonsimbiotis berlangsung melalui penyerapan hara hasil pelarutan oleh kelompok mikroba pelarut fosfat, dan hasil perombakan bahan organik oleh kelompok organisme perombak (Suriadikarta & Simanungkalit 2006). Pemanfaatan pupuk hayati yang sesuai dengan kondisi tanah dan target peruntukannya merupakan alternatif untuk meningkatkan kesuburan tanah dan produktivitas tanaman, mengefisienkan penggunaan pupuk anorganik, dan mengurangi bahaya pencemaran lingkungan.

Saat ini aplikasi pupuk hayati merupakan alternatif ramah lingkungan yang sedang berkembang diaplikasikan di dunia pertanian. Pengaplikasian pupuk hayati dapat menjadikan unsur-unsur yang tidak tersedia karena terikat dalam koloid tanah, menjadi tersedia. Hal ini disebabkan karena aktivitas mikroba dalam pupuk hayati yang dapat melepas khelat unsur-unsur yang terikat dalam koloid tanah. Pupuk hayati sebagai kegiatan mikrobiologis bukanlah pupuk biasa (kimia anorganik) yang secara langsung meningkatkan kesuburan tanah dengan menambahkan nutrisi ke dalam tanah. Pupuk hayati atau mikrobiologis menambahkan nutrisi melalui proses alami, yaitu fiksasi nitrogen atmosfer, menjadikan fosfor bahan yang terlarut, dan merangsang pertumbuhan tanaman melalui sintesis zat-zat yang mendukung pertumbuhan tanaman. Mikroorganisme dalam pupuk hayati mengembalikan siklus nutrisi alami tanah dan membentuk material organik tanah. Melalui penggunaan pupuk hayati, tanaman yang sehat dapat ditumbuhkan sambil meningkatkan keberlanjutan dan kesehatan tanah.

Pupuk hayati memberi manfaat bagi pertumbuhan tanaman dan meningkatkan hasil panen melalui perannya memfiksasi N pada tanah yang kaya jenis mikro dan makro-nutrisi, melarutkan P dan K atau mineralisasi, melepaskan zat pengatur tumbuh tanaman, dan memproduksi antibiotik serta merombak bahan organik (Sinha *et al.*, 2014). Ketika pupuk hayati diaplikasikan pada benih atau tanah, mikroorganisme yang terkandung di dalamnya akan berkembang biak dan berperan aktif dalam pemberian nutrisi dan meningkatkan produktivitas tanaman (Singh *et al.*, 2011). Pemanfaatan pupuk hayati yang sesuai dengan kondisi tanah dan target peruntukannya merupakan alternatif untuk meningkatkan kesuburan tanah, efisiensi pemupukan anorganik, produktivitas tanaman dan mengurangi bahaya pencemaran lingkungan. Pupuk hayati fungsinya antara lain untuk membantu penyediaan hara bagi tanaman, mempermudah penyerapan hara bagi tanaman, membantu dekomposisi bahan organik, menyediakan lingkungan rhizosfer yang lebih baik sehingga pada akhirnya mendukung pertumbuhan dan meningkatkan produksi tanaman (Saraswati 2012).

Mikroorganisme yang umum digunakan sebagai bahan aktif pupuk hayati ialah mikroorganisme penambat N, pelarut P, dan mikroorganisme penghasil zat pengatur tumbuh (ZPT). Mikroorganisme yang teridentifikasi sebagai penyedia unsur nitrogen antara lain: *Azotobacter chroococcum*, *Azomonas agilis*, *Azotobacter beijerinckii*, *Azospirillum lipoperum*, *Azospirillum brasilense*, *Blue Green Algae*, *Rhizobium japonicum*, *Rhizobium lupine*, dan *Rhizobium leguminosarum*. Kelompok mikroorganisme pelarut fosfat antara lain *Aspergillus niger*, *Bacillus megaterium*, *Lolium multiflorum*, *Bacillus cereus*, *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas diminuta*, dan *Penicillium* (Syarifudin 2002). Mikroorganisme pelarut fosfat mampu mengubah bentuk P terfiksasi menjadi P yang lebih larut dan mudah diambil tanaman (Rodriguest & Fraga dalam Mittal *et al.* 2008). Selain itu, mikroorganisme

ini juga meningkatkan pertumbuhan dengan mekanisme memproduksi fitohormon seperti IAA yang merupakan pemacu tumbuh tanaman (Mittal *et al.*, 2008).

Bakteri *Azotobacter* dan *Azospirillum* dapat memacu pertumbuhan tanaman melalui fiksasi nitrogen, dan menghasilkan hormon pertumbuhan seperti auksin, giberelin, dan sitokinin (Nasahi 2010). Auksin berperan sebagai hormon pemacu tumbuh pada tanaman dan biasanya ditemukan pada jaringan meristem. Sitokinin dan giberelin berperan dalam perkembangan dan pembelahan sel. IAA yang dihasilkan oleh bakteri dalam tanaman berperan meningkatkan jumlah rambut akar dan akar lateral tanaman. Hormon IAA mampu mensintesis unsur hara yang secara biologis dapat meningkatkan perkecambahan biji, tinggi dan pertumbuhan tanaman. Menurut Pan *et al.* (1999), hormon yang dihasilkan oleh bakteri tanah dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman baik secara langsung maupun tidak langsung. Pengaruh secara langsung dengan cara meningkatkan pertumbuhan tanaman, dan sebagai fasilitator dalam penyerapan beberapa unsur hara dari lingkungan. Sedangkan secara tidak langsung, melalui mekanisme penghambatan organisme patogen pada tanaman oleh fitohormon yang dihasilkan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa berbagai mikroba yang diisolasi dari lahan pasang surut sangat berpotensi sebagai komponen pupuk hayati melalui perannya sebagai perombak bahan organik, penambat N, dan pelarut P, sehingga hara-hara yang ada dalam tanah menjadi lebih tersedia bagi tanaman. Pupuk hayati Biotara merupakan pupuk hayati yang adaptif tanah masam di lahan pasang surut dan efektif meningkatkan produktivitas tanaman. Komposisi terdiri dari konsorsia mikroba dekomposer (*Trichoderma* sp.), pelarut-P (*Bacillus* sp.), dan penambat N (*Azospirillum* sp.). Penggunaan pupuk hayati Biotara 25 kg/ha yang dikombinasikan dengan pupuk NPK Pelangi 150 - 300 kg/ha mampu meningkatkan hasil padi sampai 9,92% dan menghemat penggunaan urea sebesar 100 kg/ha (100%). Bakteri penambat N (*Azotobacter* sp.) mampu mengurangi takaran pemupukan urea yang dianjurkan hingga 75%. Isolat-isolat bakteri pelarut fosfat yang diisolasi dari beberapa lokasi di lahan pasang surut diketahui mempunyai kemampuan dalam melarutkan P di lahan pasang surut sulfat masam.

Teknologi *Bioleaching*

Pencucian dengan mikrob (*bioleaching*) merupakan salah satu cara untuk mengurangi kemasaman tanah di lahan pasang surut sulfat masam terdegradasi. Teknologi ini terbukti mempunyai potensi untuk menyelesaikan masalah dalam pengolahan mineral berkadar logam rendah maupun tinggi. Mikroorganisme yang mempunyai potensi untuk dikembangkan dan memegang peranan penting dalam proses-proses *bioleaching* adalah *Thiobacillus ferrooxidans* dan *Thiobacillus thiooxidans*. Bakteri ini menggunakan beberapa bentuk sulfur sebagai energi dan mereduksi CO₂ dari sumber karbon sehingga dikenal bersifat chemoautotrophic,

yaitu bakteri yang kegiatan atau pengambilan energinya berasal secara kimiawi dalam proses reaksi-reaksi kimiawi. Penggunaan kombinasi kedua bakteri ini ditujukan untuk lebih mengoptimalkan desulfurisasi. *T. ferrooxidans* memiliki kemampuan untuk mengoksidasi besi dan sulfur, sedangkan *T. thiooxidans* tidak mampu mengoksidasi sulfur dengan sendirinya, namun tumbuh pada sulfur yang dilepaskan setelah besi teroksidasi (Evangelou & Chang 1995).

Prosedur penerapan teknologi bioleaching adalah lahan dibersihkan dari gulma dan sisa-sisa perakaran tanaman yang masih ada di lahan. Kemudian tanah dicangkul/rotari dan bongkahan tanah di pecah-pecah hingga dapat memberi kondisi yang baik untuk memungkinkan akar tanaman dapat tumbuh dan berkembang dengan optimum. Pengolahan tanah dilakukan dengan menggunakan cangkul atau traktor sedalam 30-35 cm. Formula mikroba (*T. ferrooxidans* dan *T. thiooxidans*) dilarutkan dengan air dengan dosis 20 kg/ha. Kemudian formula tersebut diinokulasikan dengan cara menyiramkannya merata ke lahan yang sudah diolah tersebut. Pencucian dilakukan 15 hari setelah aplikasi formula mikroba dan diulang sebanyak 8 kali dengan selang pencucian 6 hari. Pencucian menggunakan air di sekitar saluran tersier yang dipompa menggunakan menggunakan mesin penyedot (genset) dan dialirkan ke petakan sampai menggenang sekitar 1-2 cm. Kemudian air tersebut dikeluarkan lagi untuk mencuci unsur beracun yang terkandung pada lahan sulfat masam (Mukhlis 2012). Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknologi *bioleaching* dapat meningkatkan pH dan kandungan hara tanah, dan produktivitas tanaman padi di lahan sulfat masam bongkor (Mukhlis dan Lestari 2019).

STRATEGI IMPLEMENTASI

Meskipun konsep pemupukan berimbang telah diperkenalkan sebelum tahun 1990, namun hingga kini penerapannya masih kurang sesuai. Pemupukan berimbang seharusnya dapat membuat kondisi hara dalam tanah menjadi berimbang melalui penambahan jenis dan jumlah pupuk tertentu sesuai kebutuhan tanaman. Namun terdapat pengertian yang salah hingga saat ini, diantaranya dengan diproduksi pupuk majemuk NPK dengan kandungan N, P, dan K yang sama dan diberikan dalam dosis yang relative sama di semua lokasi. Saat ini, pemerintah telah mensubsidi pupuk NPK majemuk dan masuk sebagai paket bantuan dalam program peningkatan produksi padi. Pengertian yang kurang tepat terhadap penerapan pemupukan berimbang dan cenderung identik dengan pemberian pupuk majemuk berakibat pemborosan penggunaan pupuk. Disamping itu, pemahaman dan pola pikir Dinas Pertanian Kabupaten/Kota dan Provinsi terhadap pemupukan berimbang sangat minim. Dalam aplikasi pupuk berimbang

diperlukan data hasil analisis tanah dan kebutuhan hara tanaman selama masa pertumbuhannya. Namun pentingnya data analisis tanah ini tidak dijadikan dasar oleh para aparat untuk menentukan dosis pemupukan berimbang yang spesifik lokasi. Disamping itu, kebijakan yang ada belum mampu mendorong dan menciptakan kondisi pembangunan pertanian berbasis sumberdaya lokal, kearifan dan pengetahuan lokal. Padahal, kebanggaan petani akan pengetahuan lokal dan implementasinya dalam melakukan kegiatan usahatani merupakan celah masuk dalam strategi peningkatan ketangguhan petani dalam menerapkan pemupukan berimbang. Berbagai jerami, gulma, kotoran hewan, dan pembuatan mikroorganisme lokal (MOL) merupakan sumber hara yang berpotensi besar dalam menunjang penerapan pemupukan berimbang.

Sejalan dengan hal tersebut, kontribusi pupuk hayati di lahan pasang surut sulfat masam terdegradasi masih rendah dibandingkan potensinya. Potensi bakteri penambat N dapat dimanfaatkan untuk mensuplai kebutuhan N tanaman hingga 75%, mikroba pelarut P berperan penting dalam meningkatkan ketersediaan P hingga 50%. Sedangkan potensi pangsa pasar pupuk hayati di lahan pasang surut relatif besar. Estimasi potensi permintaan pupuk hayati untuk padi saja sekitar 3.000 – 5.000 t/tahun dan kebutuhan dekomposer 15.000 – 30.000 t/tahun. Perkiraan ini didasarkan potensi lahan pertanian atau luas areal lahan pertanian di lahan pasang surut dan potensi limbah pertanian (jerami, jagung, dan lainnya). Bila dibandingkan dengan potensi permintaan pupuk hayati dengan kondisi eksis saat ini penggunaan pupuk hayati maupun dekomposer, peluang untuk mengembangkan pupuk hayati masih terbuka lebar.

Berdasarkan hal-hal tersebut, maka strategi implementasi pengelolaan terpadu inovasi kesuburan lahan dapat dilakukan melalui (1) pengembangan pemupukan berimbang spesifik lokasi dengan memanfaatkan pupuk anorganik, yang disenergikan dengan pupuk organik dan atau pupuk hayati; (2) teknologi pemupukan perlu difokuskan pada aspek penyediaan bahan baku lokal pupuk anorganik untuk mengurangi ketergantungan impor, teknik produksi yang efisien, dan pemanfaatan bahan alami untuk pupuk organik dan hayati termasuk produksi yang bersifat lokal (non pabrikasi); (3) rekomendasi pemupukan padi lahan rawa spesifik lokasi dapat didekati dengan penggunaan alat bantu seperti Perangkat Uji Tanah Rawa dan perangkat lunak Decision Support System (DSS) yang sudah teruji dapat menentukan dosis pupuk yang lebih efektif dan efisien; (4) fasilitasi pemberian subsidi pupuk melalui bantuan langsung (BLP) dan tidak langsung (bantuan alat pengolah pupuk organik); (5) revitalisasi penyuluhan inovasi teknik pupuk dan pemupukan; dan (6) meningkatkan pengawasan ketersediaan dan penggunaan pupuk.

PENUTUP

Pengelolaan kesuburan lahan merupakan salah satu faktor terpenting dalam mencapai hasil yang optimal dan berkelanjutan. Oleh karena itu, pengelolaan kesuburan lahan (tanah) harus diupayakan tanpa menyebabkan kerusakan terhadap lingkungan maupun menurunkan kualitas sumberdaya lahan, dan sebaiknya diarahkan pada perbaikan sifat fisika, kimia, dan aktivitas biologi tanah yang optimum bagi tanaman. Dengan demikian, interaksi antara komponen- komponen biotik dan abiotik tanah pada lahan memberikan keseimbangan yang optimal bagi ketersediaan hara dalam tanah, yang selanjutnya menjamin keberlangsungan produktivitas lahan, dan keberhasilan usaha tani.

Prinsip pengelolaan terpadu inovasi kesuburan lahan adalah (a) memperbaiki kesuburan kimia tanah dengan memberikan unsur mikro dan makro, enzyme, hormon, asam-asam amino yang cukup; (b) memperbaiki kesuburan fisik tanah dengan meningkatkan nilai Kapasitas Tukar Kation (KTK) tanah dan memperbaiki keseimbangan pori mikro dan makro tanah (kegemburan tanah); dan (b) memperbaiki kesuburan biologi tanah dengan memberikan lingkungan yang sesuai untuk pertumbuhan mikroorganisme yang berguna bagi tanaman. Dengan demikian, pengelolaan terpadu inovasi kesuburan lahan yang berupa kombinasi antara pupuk anorganik, pupuk organik, dan pupuk hayati secara terintegrasi dan berimbang akan saling mendukung terhadap kesehatan tanah, kualitas tanah, produktivitas tanah dan tanaman secara berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Kepala Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian dan Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa atas dukungan penyusunan naskah ini. Terima kasih disampaikan kepada Tim Penyunting yang telah memberikan saran yang konstruktif terhadap naskah yang kami susun. Dalam naskah ini Mukhlis adalah sebagai kontributor utama dan Wahida Annisa sebagai kontributor anggota.

DAFTAR PUSTAKA

- Alwi, M. dan Fahmi, A. 2016. Decision support system (DSS) pemupukan padi lahan rawa. Hlm 366-374. Prosiding Seminar Nasional Inovasi Teknologi Pertanian. Banjarbaru, 20 Juli 2016.
- Andersen, R., Wells C., Macrae, M., and Price, J. 2013. Nutrient mineralisation and microbial functional diversity in a restored bog approach natural conditions 10 years post restoration. *Soil Biology & Biochemistry* 64: 37-47.

- Annisa, W. 2014. Peran Bahan Organik dan Tata Air Mikro Terhadap Kelarutan Besi, Emisi CH₄, Emisi CO₂ dan Produktivitas Padi di Lahan Sulfat Masam. Disertasi. Universitas Gadjah Mada (tidak dipublikasikan).
- Annisa, W. dan Nursyamsi, D. 2016. Iron dynamics and its relation to soil redox potential and plant growth in acid sulphate soil of South Kalimantan, Indonesia. *Indonesian Journal of Agricultural Science*, 17(1): 1-8.
- Balittra. 2011. Setengah Abad Balittra: Rawa Lumbung Pangan Menghadapi Perubahan Iklim. Banjarbaru: Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa. 71 Hlm.
- Baldwin, D.S. dan Fraser, M. 2009. Rehabilitation options for inland waterways impacted by sulfidic sediments - A synthesis. *Journal of Environmental Management*, 91: 311-319.
- BBSDLP. 2011. Laporan Tahunan. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Bogor. 113 Hlm.
- Bhattacharyya, P., Roy, K.S., Neogi, S., Chakravorti, S.P., Behera, K.S., Das, K.M., Bardhan, S., and Rao, K.S. 2012. Effect of long-term application of organic amendment on C storage in relation to global warming potential and biological activities in tropical flooded soil planted to rice. *Nutrient Cycling Agroecosystem*, 94: 273–285.
- Claff, S.R., Sullivan, L.A., Burton, E.D., and Bush, R.T. 2010. A sequential extraction procedure for acid sulfate soils: Partitioning of iron. *Geoderma*, 155: 224–230.
- Clarkson, B. and Peters M. 2010. Wetland types. *In*. B. Clarkson and M. Peters (Eds.): *Wetland Restoration: A Handbook for Nz Freshwater System*. Manaaki Whenua Press, New Zealand. pp. 26–37.
- Dear, S.E., Moore, N.G., Dobos, S.K., Watling, K.M., and Ahern, C.R. 2002. Soil Management Guidelines. *In* Queensland Acid Sulfate Soil Technical Manual. Department of Natural Resources and Mines, Indooroopilly, Queensland, Australia.
- Dierolf, T., Fairhurst, T., and Mutert, E. 2000. Soil Fertility Kit: A Toolkit for Acid, Upland Soil Fertility Management in Southeast Asia. Handbook Series. 149p.
- Dobermann, A. and Fairhurst, T. 2000. Rice: Nutrient Disorders and Nutrient Management. IRRI. Makati City, The Philippines. 191 p.
- Dobermann, A., Witt, C., and Dawe, D. 2004. Increasing the Productivity of Intensive Rice Systems Through Side-Specific Nutrient Management. Science Publishers Inc. and International Rice Research Institute (IRRI).
- Enio, M.S.K., Shamshuddin, J., Fauziah, C.I., and Husni, M.H.A. 2011. Pyritization of the coastal sediments in the Kelantan Plains in the Malay Peninsula during the Holocene. *Amer J Agric Bio Sci*. 6(3): 393-402.

- Evangelou, V.P. and Zhang, Y.L. 1995. A Review: Pyrite oxidation mechanisms and acid mine drainage prevention. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 25(2): 141-199.
- Fitzpatrick, R.W., Shand, P., and Merry, R.H. 2009. Acid sulfate soils. In "Natural History of the Riverland and Murraylands". In Jennings JT, (Eds.), pp. 65-111. Royal Society of South Australia Inc., Adelaide, South Australia.
- Husna, N. 2014. Pengelolaan bahan organik di tanah sulfat masam. Hlm 821-827. *Dalam* Herlinda S et al. (Eds): Prosiding Seminar Nasional Lahan Suboptimal 2014. Palembang 26-27 September 2014.
- Jumberi, A. dan Alihamsyah, T. 2004. Pengembangan lahan rawa berbasis inovasi teknologi. Hlm 11-42. *Dalam* Isdijanto AR et al. (Eds): Prosiding Seminar Nasional: Inovasi Teknologi Pengelolaan Sumberdaya Lahan Rawa dan Pengendalian Pencemaran Lingkungan. Banjarbaru, 6-7 Oktober 2004. Badan Litbang Pertanian.
- Jumberi, A., Fahmi, A., dan Susilawati, A. 2007. Potensi pengelolaan jerami dan penggunaan varietas unggul adaptif sebagai komponen teknologi peningkatan produktivitas tanah sulfat masam. Hlm. 305 – 314. *Dalam* Subarja DS et al. (Eds): Prosiding Seminar Nasional Sumberdaya Lahan Pertanian. Bogor, 14 – 15 September 2006. Buku III. Balai Besar Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Litbang Pertanian.
- Las. I., Subagyo, K., dan Setiyono, A.P. 2006. Isu dan pengelolaan lingkungan dalam revitalisasi pertanian. *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pertanian*, 25(3): 106-114.
- Makarim, A.K. dan Suhartatik, E. 2006. Budidaya padi dengan masukan in situ menuju perpaduan masa depan. *IpTek Tanaman Pangan*, 1(1): 19-29.
- Maria, E., Freeman, C., and David R. 2012. Impact of pH and redox potential changes on acidic sulphate soils. *Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*. Montreal, Quebec, Canada June 5-8 2002. 23 p.
- Mengel, K. and Kirby, E.A. 1987. *Principles of Plant Nutrition*. International Potash Institute, Bern, Switzerland. 335p
- Mittal, V., Singh, O., Nayyar, H., Kaur, J., and Tewari R. 2008. Stimulatory effect of phosphate-solubilizing fungal strains (*Aspergillus awamori* and *Penicillium citrinum*) on the yield of chickpea (*Cicer arietinum* L. cv. GPF2). *Soil Biology & Biochemistry*, 40: 718-727.
- Mukhlis, Indrayati, L., Saleh, M., Fauziati, N., Maftu'ah, E., dan Umar, S. 2009. Percepatan penerapan teknologi pemanfaatan bahan organik dan pemupukan berimbang di lahan rawa. *Laporan Hasil Penelitian*. Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa. Banjarbaru.
- Mukhlis. 2012. Efektivitas pupuk hayati biotara mengurangi penggunaan pupuk anorganik dan meningkatkan produktivitas padi di lahan rawa pasang surut. *Agroscentia*. 19(3): 170-177.

- Mukhlis dan Lestari, Y. 2019. Teknologi Bioleaching untuk mengurangi kemasaman tanah di lahan rawa pasang surut. Hlm 172-196. Dalam Masganti et al. (Eds): Sumberdaya Lahan Rawa Dukungan Teknologi Menuju Lumbung Pangan Dunia Tahun 2045. IAARD Press. Jakarta.
- Nasahi, C. 2010. Peran Mikroorganisme Dalam Pertanian Organik. UNPAD. Bandung.
- Nett, L., Ruppel, S., Ruehlmann, J., George, E., and Fink, M. 2011. Influence of soil amendment history on decomposition of recently applied organic amendments. *Soil Science Society of America Journal*, 76: 1290–1300.
- Notohadiprawiro, T. 2000. Tanah dan Lingkungan. Cetakan ke-2. Pusat Studi Sumberdaya Lahan (PPSL) univ. Gadjah Mada. Yogyakarta. 187 hlm.
- Pan, B., Bai, Y.M., Leibovitch, S., and Smith, D.L. 1999. Plant growth promoting rhizobacteria and kinetin as way to promote corn growth and yield in a short growing season area. *Agronomy Journal*, 11: 179 – 186.
- Ponnamperuma, F.N. 1984. Straw as a source of nutrients for wetland rice. Hlm. 117 – 136. *In*. Organic Matter and Rice. International Rice Research Institute. Los Banos Laguna, Philippines.
- Prihatini, T., Kentjanasari, A., dan Subowo. 1996. Pemanfaatan biofertilizer untuk peningkatan produktivitas lahan pertanian. *Jurnal Litbang Pertanian*, 15(1).
- Ritung, S., Wahyunto, Nugroho, K., Sukarman, Hikmatullah, Suparto, dan Tafakresnanto, C. 2011. Peta Lahan Gambut Indonesia, skala 1:250.000. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian, Kementerian Pertanian.
- Saraswati, R. 2007. Peran pupuk hayati dalam meningkatkan efisiensi pemupukan menunjang keberlanjutan produktivitas tanah. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 1(4): 51-56.
- Saraswati, R. 2012. Teknologi pupuk hayati untuk efisiensi pemupukan dan keberlanjutan sistem produksi. Hlm. 727-738. *Dalam* Wigena IGP et al. (Eds.): Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pemupukan dan Pemulihan Lahan Terdegradasi. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Kementerian Pertanian. Bogor. 29-30 Juni 2012.
- Sinha, R.K., Valani, D., Chauhan, K., and Agarwal, S. 2014. Embarking on a second green revolution for sustainable agriculture by vermiculture biotechnology using earthworms: reviving the dreams of Sir Charles Darwin. *Int J Agric Health Saf*, 1: 50–64.
- Singh, J.S., Pandey, V.C., and Singh, D.P. 2011. Efficient soil microorganisms: a new dimension for sustainable agriculture and environmental development. *Agric Ecosyst Environ*, 140: 339–353.

- Sudjianto, A.T., Suryolelono, K.B., Rifa'i, A., and Mochtar, B. 2011. The effect of water content change and variation suction in behavior swelling of expansive soil. *Int J Civil Environ Eng*, 11(3): 11-17.
- Sulistyawati, E., Mashita, N., and Choesin, D.N. 2008. Pengaruh Agen Dekomposer Terhadap Kualitas Hasil Pengomposan Sampah Organik Rumah Tangga. Seminar nasional Penelitian Lingkungan. Universitas Trisakti. Jakarta.
- Suriadikarta, D.A. dan Simanungkalit, R.D.M. 2006. Pendahuluan. *Dalam* Simanungkalit, R.D.M. *et al.* (Eds.): Pupuk Organik dan Pupuk Hayati. Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Bogor.
- Syarifudin, A. 2002. Teknik identifikasi mikroorganisme penyedia unsur hara tanaman pada Ultisols pulau Buru. *Bulletin Teknik Pertanian*, 7(1): 21-24.
- Van Breemen N. 1993. Environmental aspects of acid sulfate soils. p. 391–402. *In* Dent DL, and Van Mensvoort MEF (Eds.): *Selected Papers of the Ho Chi Minh City Symposium on Acid Sulfate Soils*. ILRI Publ. 53. Wageningen.