

MIKROBA POTENSIAL PADA EKOSISTEM LAHAN RAWA

Yuli Lestari dan Mukhlis

Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa (BALITTRA)

Jalan Kebun Karet Loktabat, Banjarbaru

e-mail: yulibalittra70@yahoo.com

Ringkasan

Lahan rawa merupakan ekosistem yang unik untuk mikroba, baik yang berperan penting dalam siklus hara maupun berbagai aktivitas lingkungan yang lain. Beberapa mikroba yang ada di lahan rawa diantaranya adalah bakteri, fungi (jamur), aktinomisetes. Di alam mikroorganisme dapat mempengaruhi siklus biogeokimia baik secara langsung maupun tidak langsung, mikroba terlibat dalam perubahan kimia dan pelapukan mineral. Aktivitas mikroba dapat menyebabkan presipitasi mineral, adsorpsi, pelindian (*leaching*) mineral dan pembentukan atau destruksi kompleks organik-mineral. Tingginya produktivitas dan beragamnya konversi mikroba di lahan rawa yang secara terus menerus mentransformasi hara dari vegetasi lahan rawa dalam siklus karbon, nitrogen, fosfor, sulfur dan hara lain yang diperlukan tanaman, sebaliknya tanaman memberikan eksudat yang berfungsi sebagai makanan mikroba. Analisis keragaman mikroba pada ekosistem lahan rawa bermanfaat untuk mengetahui struktur serta dinamikanya, mempermudah isolasi, identifikasi mikroba potensial yang mempunyai kekhususan tertentu untuk berbagai pemanfaatan.

Pendahuluan

Lahan rawa adalah lahan yang menempati posisi peralihan antara daratan dan peraliran sehingga sepanjang tahun atau dalam waktu yang lama yang tergenang secara periodik atau terus menerus secara alami dalam kurun waktu yang panjang dalam setahun tergenang dangkal, selalu jenuh air atau mempunyai air tanah yang dangkal (Subagyo, 2006). Berdasarkan pengaruh air pasang surut, khususnya pasang besar (*spring tides*) di musim hujan, bagian daerah aliran sungai di bagian bawah (*down stream area*), maka lahan rawa dibagi menjadi 3 zona wilayah, yaitu rawa pasang surut air asin/payau, rawa pasang surut air tawar dan rawa non pasang surut (lebak) (Subagyo, 1997) dalam Subagyo, 2006). Perbedaan kondisi hidrologi lahan rawa akan mempengaruhi proses kimia, fisika dan biologi yang terjadi.

Secara umum ada 2 jenis tanah yang terbentuk di lahan rawa yaitu tanah gambut (*peat soil*) dan non gambut (tanah mineral basah). Tanah gambut adalah tanah yang kaya bahan organik (C-organik >18%) dengan ketebalan 50 cm atau lebih (Agus dan Subiksa, 2008). Sedangkan tanah dengan ketebalan tanah gambut kurang dari 50 cm disebut tanah bergambut (Najiyati dan Muslihat, 2015). Gambut memiliki karakteristik fisika, kimia dan biologi yang spesifik. Sifat iheren bahan gambut diantaranya adalah miskin mineral, rendahnya unsur hara dan pH tanah serta adanya asam organik hasil proses dekomposisi bahan gambut yang bersifat toksik (Sabiham, 2006).

Tanah mineral rawa yang berasal dari endapan marine mengandung senyawa besi sulfida yang disebut pirit. Terdapatnya kandungan pirit di lahan rawa pasang surut seringkali menimbulkan masalah yang sulit untuk diatasi apabila tanah tersebut dibuka untuk pertanian. Senyawa pirit bersifat stabil dalam kondisi tergenang, namun apabila teroksidasi akan menghasilkan ke asaman yang tinggi, meningkatnya kelarutan Al, Fe dan Mn yang bersifat toksik. Tingginya konsentrasi Al dan Fe mempengaruhi biokimia tanah. Hanya spesies tanaman dan mikroorganisme yang toleran pada kondisi ini yang dapat survive.

Salah satu faktor yang mempengaruhi ekologi dan biokimia tanah-tanah di lahan rawa adalah proses mikrobiologi. Mikroba mempunyai peranan penting dalam siklus nutrisi dan merupakan bagian penting dalam keseimbangan biologi tanah. Mikroba ada yang hidup di rhizoplane (jaringan akar tanaman), rhizosfer (sekitar perakaran tanaman) dan non rhizosfer (tanah). Populasi, keragaman, pertumbuhan dan aktivitas mikroba salah satunya dipengaruhi oleh faktor lingkungan. Kondisi lingkungan rawa yang sangat unik dan ekstrim tersebut diduga mempengaruhi populasi, keragaman, pertumbuhan dan aktivitas mikroba.

Hasil-hasil penelitian telah menunjukkan bahwa aplikasi mikroba di lahan pertanian dapat memperbaiki kesuburan tanah, pertumbuhan dan hasil tanaman. Aplikasi pupuk hayati M-Star yang mengandung mikroba perombak bahan organik, penambat N dan pelarut P sebanyak 15 kg/ha yang dikombinasikan dengan NPK anorganik meningkatkan pertumbuhan jagung manis dan memperbaiki sifat kimia tanah. Pupuk hayati ini juga dapat meningkatkan efisiensi pemupukan NPK anorganik hingga 50% dan dapat diaplikasikan di lahan sub-optimal seperti lahan sulfat asam (Mukhlis dan Lestari, 2013). Oleh karena itu tulisan ini memaparkan beberapa mikroba potensial terutama yang berperan dalam siklus hara di lahan rawa.

Keunikan Ekosistem Lahan Rawa

Keberadaan mikroba dari suatu tempat ke tempat lainnya sangat beragam. Ekosistem lahan rawa mempunyai kondisi lingkungan yang unik, memungkinkan berpengaruh terhadap pertumbuhan, keragaman flora, fauna dan mikroba di dalamnya. Sebaliknya proses mikrobiologi juga merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi ekologi dan biokimia tanah-tanah di lahan rawa. Mikroba ada yang tumbuh di air, tanah maupun disekitar perakaran tanaman (*rhizosfer*).

Masing-masing mikroba memiliki sifat-sifat khusus dan kondisi lingkungan optimal yang berbeda-beda. Ada yang hidup pada kondisi asam, dan ada pula yang hidup pada kondisi netral dan basa serta ada yang hidup pada kondisi aerob dan anaerob. Secara umum pertumbuhan mikroba dipengaruhi oleh beberapa faktor.

Temperatur

Mikroba mempunyai suhu minimum, optimum dan maksimum untuk pertumbuhannya. Berdasarkan suhu optimum untuk pertumbuhannya mikroba terutama bakteri dibedakan menjadi 3 yaitu psikrofil, mesofil, termofil dan hipertermofil. Suhu optimum untuk pertumbuhan mikroba psikrofil, mesofil, termofil dan hipertermofil masing-masing adalah -5°C - 15°C , 25°C - 45°C , 45°C - 75°C dan 70°C - 100°C . Hasil penelitian Chadirin *et al.* (2016), suhu tanah gambut terbuka tanpa vegetasi adalah 24 - 36°C sehingga mikroba yang adaptif di lahan gambut tergolong mesofil.

Oksigen

Mikroba terutama bakteri menunjukkan variasi oksigen yang diperlukan untuk pertumbuhannya. Berdasarkan keperluan oksigen yang dibutuhkan maka dapat digolongkan menjadi 5 yaitu aerobik obligat, mikroaerofil, anaerobik obligat, aerotoleran anaerobik dan anaerobik fakultatif. Aerobik obligat hanya bisa tumbuh dengan adanya oksigen, dimana energi yang diperlukan berasal dari respirasi aerobik. Mikroorganisme mikroerofil adalah organisme yang memerlukan konsentrasi rendah oksigen untuk pertumbuhannya (2%- 10%), tetapi pada konsentrasi yang lebih tinggi pertumbuhannya terhambat dan energi yang diperlukan berasal dari respirasi aerobik. Anaerobik obligat adalah organisme yang tumbuh pada kondisi tanpa oksigen dan terhambat pertumbuhannya atau mati jika ada oksigen sedangkan energi yang diperlukan

berasal dari respirasi anaerobik atau fermentasi. Aerotoleran anaerobik seperti mikroorganisme anaerobik, tidak dapat menggunakan oksigen untuk transformasi energi tetapi masih dapat hidup. Energi diperoleh hanya dari fermentasi atau disebut juga sebagai fermentasi obligat. Anaerobik fakultatif adalah organisme yang tumbuh dengan atau tanpa oksigen tetapi pada umumnya tumbuh lebih baik pada kondisi dengan adanya oksigen. Energi yang diperlukan berasal dari respirasi aerobik jika ada oksigen, tetapi berasal dari fermentasi atau respirasi anaerobik jika tidak ada oksigen.

Tingkat keasaman (pH)

Berdasarkan pH optimum untuk pertumbuhannya mikroorganisme digolongkan menjadi neutrofil (pH 5-8), asidofil (pH<5), dan alkalifil (pH>8,5). pH tanah merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan mikroorganisme. Mikroorganisme acidofilik adalah mikroorganisme yang untuk pertumbuhannya terjadi pada pH<5. Pada pH yang rendah, terutama tanah sulfat asam total populasi mikroba rendah (Panwar, 2015). pH tanah sulfat asam sebelum teroksidasi (bahan sulfidik) berkisar 4,12-7,44, namun setelah teroksidasi berkisar 2,55-3,57 (Lestari, 2016). Pada umumnya pH tanah gambut adalah 3,0-4,5. Menurut Phung dan Liew (2017), bahwa populasi total mikroba di tanah sulfat asam yaitu antara $2-9 \times 10^5$ sel per gram tanah yang diduga karena tingginya unsur toksin yang terlarut seperti Al^{3+} , Fe^{2+} dan Mn^{2+} tinggi sehingga menghambat pertumbuhan mikroba. Pada tanah sulfat asam potensial dengan pH 4,9 total mikroba adalah $8,93 \times 10^5$ sel/gram tanah lebih tinggi daripada tanah sulfat asam aktual dengan pH <3,5, total populasi mikroba $3,69 \times 10^5$ sel/gram tanah.

Vegetasi

Pada tanah sulfat asam, populasi mikroba juga sangat bervariasi tergantung tipe vegetasi yang tumbuh dan praktek pengelolaan tanah (Panwar, 2015). Pada tanah-tanah yang digunakan untuk budidaya tanaman, populasinya lebih tinggi dibandingkan yang diberakan dan yang paling tinggi ada di rhizosfer legume seperti *Stylosanthes* (Phung dan Liew, 2017). Diduga konsentrasi Al^{3+} pada tanah-tanah yang digunakan untuk budidaya lebih rendah dibandingkan yang diberakan sehingga mempengaruhi kelimpahan mikroorganisme. Hasil penelitian Lestari dan Mukhlis (2008), menunjukkan bahwa populasi bakteri pelarut fosfat pada setiap perakaran tumbuhan berbeda. Populasi bakteri pelarut P di perakaran *Melastoma affine* (karamunting), *Stenochlaena polutris*

Menurut Nannipieri *et al.* (2017) bahwa tanah merupakan sebuah sistem yang kompleks dan dinamis. Karakter kimia, fisik dan biologi tanah berbeda dari waktu ke waktu yang dipengaruhi jenis tanah, iklim dan praktek pengelolaannya berubah-ubah sebuah sistem biologi yang dinamis dan kompleks. Oleh karena itu, masing-masing mikroba memiliki sifat-sifat khusus dan kondisi lingkungan optimal yang tidak sama, maka perbedaan karakteristik tanah sebagai mikro habitat mengakibatkan keragaman, populasi dan aktivitas mikroba yang mengkolonisasinya berbeda.

Peranan Mikroba pada Ekosistem Lahan Rawa

Pada ekosistem rawa, mikroba mempunyai peranan yang besar dalam siklus hara seperti siklus C, N, P dan S. Beberapa hara yang diperlukan tanaman berasal dari pelapukan mineral silikat, seperti feldspar, mika dan hornblende memberikan kalsium, magnesium dan potasium, sedangkan apatit merupakan mineral utama sebagai sumber fosfor. Pelapukan mineral oleh bakteri dan fungi memainkan peranan penting dalam siklus ion dan hara tanaman.

Karbon merupakan kunci utama penyusun semua organisme yang hidup. Lahan basah (*wetlands*) termasuk lahan rawa mempunyai peran penting terhadap siklus karbon. Tanaman dan bakteri fototrof mampu memfiksasi karbondioksida dan mengkonversinya menjadi bahan organik. Di dalam tanah, mikroba saprofit mengkonversi bahan organik menjadi karbondioksida melalui respirasi. Proses perombakan bahan organik dengan bantuan mikroba disebut dekomposisi guna mendapatkan energi untuk pertumbuhannya. Mineralisasi bahan organik terjadi ketika degradasi secara sempurna menjadi produk anorganik seperti karbondioksida, amoniak dan air. Di dalam tanah, agen dekomposisi bahan organik adalah bakteri dan fungi. Beberapa genus mikroba ini ada yang mampu mendegradasi bahan organik secara anaerobik (fermentasi) yang menghasilkan senyawa organik dan gas hidrogen dan karbon dioksida. Bakteri yang tergolong *Bacteroidetes* membantu mendegradasi senyawa karbon rekalsitran seperti selulose, lignin dan kitin. Untuk mendukung produksi dan transport enzim ekstraseluler, bakteri ini memerlukan ketersediaan N yang tinggi (Treseder *et al.*, 2011). Sebaliknya bakteri adaptif terhadap kondisi N lingkungan yang rendah, dan memanfaatkan metabolisme senyawa N-organik seperti asam amino (Aislabie dan Deslippe, 2013).

Semua organisme memerlukan nitrogen yang berfungsi sebagai penyusun utama protein dan asam nukleat. Hewan menggunakan nitrogen dari sumber organik, tanaman menggunakan sumber nitrogen anorganik seperti ammonium

dan nitrat atau sumber nitrogen yang relatif depolimerisasi seperti asam amino tunggal (glisin), sedangkan mikroba menggunakan ammonium atau nitrat untuk pertumbuhannya. Salah satu sumber ammonium yang diperlukan oleh tanaman atau mikroba berasal dari bahwa dekomposisi bahan organik tanah yang disebut amonifikasi (Aislabie dan Deslippe, 2013). Selanjutnya pada kondisi yang sedikit asam, bakteri nitrifikasi mentransformasi NH_4^+ menjadi nitrit (NO_2^-) (seperti *Nitrosomonas*) yang selanjutnya menjadi nitrat (NO_3^- oleh *Nitrobacter*). Jika nitrat tersedia akan digunakan sebagai akseptor elektron yang pertama digunakan setelah oksigen rendah. Proses ini berlangsung secara anaerobik yang disebut nitrifikasi yang menghasilkan N_2O atau N_2 . Proses lain perubahan nitrogen (N_2) menjadi NH_4^+ yang sangat penting di biosfer adalah fiksasi nitrogen yang dikatalisis oleh enzim nitrogenase.

Fosfor merupakan unsur yang ketersediannya sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan. Pada kondisi asam fosfor terpresipitasi sebagai AlPO_4 dan FePO_4 , sedangkan pada pH basa sebagai CaPO_4 . Mikroba dapat mentransformasi fosfor melalui dua cara, yaitu secara kimia maupun biologi. Transformasi fosfor dari bahan organik melalui mineralisasi P-organik (terutama terjadi pada ester fosfat), untuk membentuk fosfat anorganik yang dikatalisis oleh enzim fosfatase yang diproduksi oleh beberapa bakteri dan fungi. Enzim ini berperan menghidrolisis anhidrat dari $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$, serta bertanggung jawab pada proses mineralisasi P-organik tanah (Lal, 2002 In Suliasih dan Rahmat, 2006). Hasil penelitian Poomurugan dan Gopi (2006), menunjukkan bahwa terdapat korelasi positif antara aktivitas enzim fosfatase yang diproduksi oleh *phosphobacteria* strain GP02 dan SP03 dengan kapasitas pelarutan fosfat.

Transformasi P dari bentuk P tidak larut menjadi P-larut dapat dimediasi oleh produksi asam organik dari mikroba (Aislabie dan Deslippe, 2013). Mikroba mengekskresikan sejumlah senyawa organik berbobot molekul rendah seperti sitrat, formiat, suksinat, asetat, propionate, butirat dan oksalat (Setiawati *et al.*, 2008). Selanjutnya asam organik ini akan bereaksi dengan unsur pengikat fosfat seperti Al, Fe, Ca dan Mg dengan membentuk kelat organik yang stabil sehingga mampu membebaskan ion fosfat kemudian dapat diserap oleh tanaman (Ginting *et al.*, 2006).

Di dalam tanah, siklus S mempunyai 2 aspek utama yaitu sebagai sumber nutrisi tanaman dan toksin sulfide terhadap tanaman. Tanah sulfat asam yang digunakan untuk budidaya padi seringkali keracunan H_2S . Dalam transformasi sulfur, mikroorganisme mempunyai peran yang penting. Proses transformasi utama yang terlibat dalam siklus sulfur di lingkungan adalah: (i) Mineralisasi

sulfur organik menjadi bentuk anorganik, hidrogen sulfida dan H₂S, (ii) imobilisasi, (iii) oksidasi dan (iv) reduksi. Pada proses mineralisasi, senyawa sulfur organik didekomposisi oleh mikroba menjadi senyawa anorganik yang lebih kecil. Pada proses imobilisasi, mikroba mengabsorpsi sulfat anorganik dan mengkonversinya menjadi bentuk organik untuk sintesis jaringan mikroba (Behera *et al*, 2014). Pada kondisi lingkungan yang anaerobik SO₄²⁻ direduksi oleh bakteri anaerobik yang menghasilkan bau seperti telur busuk, sebaliknya pada kondisi aerobik, bakteri kemoorganotrof aerobik (seperti *Thiobacillus*) mengoksidasi S₂ menjadi S dan selanjutnya menjadi SO₄²⁻.

Kelompok bakteri lain yang secara ekologi sangat penting di lahan rawa adalah metanogen (penghasil CH₄) dan metanotrof (pengoksidasi CH₄). Metanogen mempunyai peranan yang sangat penting dalam emisi metana pada kondisi anaerobik melalui metanogenesis (Pandey *et al.*, 2015). Metana (CH₄) merupakan gas rumah kaca yang sangat penting dalam perubahan iklim karena potensi pemanasannya sekitar 25 kali lebih besar dibandingkan CO₂ (IPPC, 2007). Oksidasi CH₄ oleh bakteri metanotrof menghasilkan CO₂. Metanogen dan metanotrof mempunyai peranan yang sangat penting dalam siklus karbon secara global melalui dekomposisi anaerobik dari bahan organik terhadap lingkungan aerobik (Pandey *et al.*, 2015).

Keragaman mikroba pada ekosistem lahan rawa

Mikroba perombak bahan organik

Karbon merupakan bentuk dasar dari bahan organik. Senyawa lignoselulosa mengandung tiga polimer, yaitu selulosa, hemiselulosa dan lignin. (Perez *et al*. 2002). Hidrolisis sempurna senyawa lignoselulosa sebagian besar menghasilkan glukosa. Namun demikian degradasi senyawa lignoselulosa sangat sulit karena struktur kristal dari selulosa (Koesnandar, 2008). Degradasi, dekomposisi dan mineralisasi bahan organik dipacu oleh mikroba heterotrof. Beberapa enzim yang terlibat dalam dekomposisi bahan organik diantaranya adalah *selulase*, *lignoselulase* dan *cytinolytic*.

Selulosa merupakan karbohidrat utama yang disintesis oleh tanaman dan menempati hampir 60% komponen penyusun struktur tanaman. Selulosa merupakan komponen penyusun dinding sel tanaman dan jumlahnya melimpah. Hidrolisis selulosa menjadi glukosa dapat berlangsung secara fisik, kimia maupun biologi. Proses hidrolisis selulosa secara biologi dilakukan oleh enzim selulase. Selulase merupakan enzim yang dapat memutus ikatan glukosida

p-1,4 di dalam selulosa. Enzim ini terdiri dari tiga komponen yaitu endo 1,4 β -glukanase, ekso 1,4 β -glukanase (celobiohydrolase) dan β glukosidase yang mampu memecah komponen serat kasar menjadi karbohidrat terlarut (Howard *et al.*, 2003). Endoglukanase memecah selulosa secara acak menjadi selo-oligosakarida. Eksoglukanase memecah selulosa dari rantai ujung non reduksi dengan melepas selobiosa, sedangkan β -glukosidase menghidrolisis selubiosa dan oligosakarida menjadi glukosa yang selanjutnya dapat digunakan sebagai energi, oleh mikroba (Lamid *et al.*, 2010). Enzim selulase dihasilkan oleh beberapa mikroba seperti bakteri, jamur dan aktinomisetes. Aktivitas selulase dari masing-masing isolat bakteri maupun jamur berbeda beda. Wizna *et al* (2007) berhasil mengisolasi dan menguji aktivitas mikroba penghasil selulase dari serasah hutan di Lembah Anai Tanah Datar dan hutan rawa di Pesisir Selatan, Sumatera Barat. Aktivitas selulase Cx dan C1 dari *B. amyloliquefaciens* masing-masing adalah 0,368 dan 0,812 unit ml⁻¹, *B.coagulans* masing-masing adalah 0,488 dan 1200 unit/ml dan *T. harzianum* masing-masing adalah 0,655 dan 0,3070 unit/ml.

Roslan *et al.* (2016) berhasil mengisolasi 4 isolat bakteri pendegradasi lignin dari lahan rawa gambut di Pahang, Malaysia. Keempat isolat tersebut adalah AR3, AR8, AR10 dan AR13 mampu tumbuh pada media M1 yang mengandung lignin, bersifat gram negatif dengan morfologi dan ukuran yang bervariasi dari kecil hingga medium. Warna koloni AR8 dan AR13 translucent, sedangkan AR3 dan AR10 kuning dan pigmen pink. Identifikasi secara molekuler berdasarkan 16s rRNA isolat AR3, AR8 dan AR13 tergolong *Burkholderia* sp, sedangkan AR10 tergolong *Serratia* sp.

Polisakarida lain yang juga melimpah di alam dan merupakan penyusun bahan organik adalah kitin dan pectin. Kedua jenis polisakarida tersebut berada di dalam matrik dinding sel organisme prokariot dan eukariot yang selalu ada di dalam tanah (Manucharova, 2009). Beberapa bakteri seperti *Bacillus*, *Pseudomonas*, dan *Vibrio* mampu menghasilkan enzim *chitinolytic* atau *chitinoclastic* yang mampu mendegradasi kitin. Pektin didekomposisi pada kondisi anaerobik oleh sejumlah bakteri seperti *Clostridium pectinovorum* dan menghasilkan asam *pectic* dan methanol (Das *et al*, 2006).

Bakteri penambat nitrogen

Penambatan nitrogen (fiksasi nitrogen) adalah proses konversi gas dalam bentuk N₂ menjadi bentuk seperti amoniak atau nitrogen organik oleh enzim *nitrogenase* dari beberapa bakteri atau cyanobakter. Enzim nitrogenase ini

sangat sensitif terhadap oksigen, sehingga untuk aktivitasnya memerlukan kondisi lingkungan dengan konsentrasi oksigen yang rendah. Fiksasi nitrogen ini memerlukan energi cukup besar. Setiap mol N yang difiksasi memerlukan 16 mol ATP. Amonium hasil fiksasi N diasimilasi asam amino dan selanjutnya mengalami polimerisasi untuk membentuk protein.

Bakteri penambat nitrogen dibedakan menjadi penambat nitrogen bebas (*free living organism*) dan simbiotik. Fiksasi nitrogen secara heterotropik diregulasi oleh faktor lingkungan tertentu seperti oksigen, N-tersedia dan karbon sebagai sumber energi (Sahoo and Dhal, 2009). Energi untuk fiksasi nitrogen berasal dari daun dan akar yang didekomposisi oleh mikroflora bukan penambat nitrogen yang mengkolonisasi di lingkungan rawa. Selain itu eksudat akar dari tanaman juga memasok energi yang diperlukan untuk fiksasi nitrogen. Beberapa bakteri penambat nitrogen bebas (non simbiotik) seperti *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Burkholderia*, *Clostridium* dan beberapa metanogen yang mungkin berasosiasi dengan rizosfer tanaman. Bakteri penambat nitrogen secara simbiotik seperti *Rhizobium*, *Shinorhizobium*, *Mesorhizobium* dan *Frankia*. Laju fiksasi nitrogen secara simbiotik seringkali dua atau tiga kali lebih tinggi dibandingkan simbiotik non simbiotik (Aislabie and Deslippe, 2003)..

Razie (2003) berhasil mengisolasi bakteri penambat N bebas *Azotobacter* sp dari rizosfer padi lahan pasang surut Kalimantan Selatan. *Azotobacter* TB.PDST.2b dan T.HM.BPMT.2b mampu memasok pertumbuhan awal tanaman padi IR-64 masing-masing sebesar 2,34% dan 2,14%. Kemampuan kedua *Azotobacter* tersebut sudah menyamai pasokan N dari pupuk urea sebesar 2,2% N (Razie, 2003). Hasil penelitian Razie dan Anas (2005) isolat *Azotobacter* TB.PDST.2b mampu menghasilkan IAA yang dapat menstimulasi pertumbuhan akar padi varietas IR-64 seperti meningkatnya luas permukaan akar, panjang akar, total panjang akar, bobot kering akar dan perumbuhan akar rambut. IAA yang dihasilkan sebanyak 36,67 ppm pada media tanpa urea dan 25,57 pada media yang ditambah urea.

Martani *et al.* (2001) telah berhasil mengisolasi *Rhizobium* dari akar kedelai tanah sulfat asam Kalimantan Selatan sebanyak 69 isolat dan gambut Kalimantan Tengah, Kalimantan Selatan, Riau dan Jawa Tengah masing-masing sebanyak 5 isolat, 3 isolat, 3 isolat dan 5 isolat. Diantara isolate-isolat tersebut mempunyai kisaran pH yang luas untuk pertumbuhannya (4-8), toleran keracunan aluminium dan toleran beberapa pestisida seperti deltametrin, paraquat dan carbamat.

Hasil penelitian Sato *et al.* (2009) yang meneliti keragaman bakteri penambat N (diazotropik) menggunakan kloning sekuen gen *nifH* secara langsung dari amplifikasi DNA tanah gambut dan tanah liat berpasir menunjukkan bahwa keragaman dan komposisi filogenetik *nifH* tergantung pada sifat tanah dan tidak berbeda antara rhizosfer dan tanah. Berbeda dengan tanah sulfat asam, keragaman gen *nifH* pada rhizosfer lebih tinggi dibandingkan pada tanah. Dengan demikian dapat disimpulkan, bahwa akumulasi bakteri diazotrof tergantung lingkungannya dan peran lainnya juga berbeda diantara tipe tanah.

Mikroba pelarut fosfat

Tanah-tanah pada lahan rawa khususnya tanah sulfat asam pada umumnya mempunyai pH yang rendah ($\text{pH} \pm 3$), kemampuan yang tinggi dalam memfiksasi fosfor, dan sering muncul gejala defisiensi fosfor pada beberapa tanaman. Pada pH rendah, fosfor difiksasi oleh Al dan Fe. Mikroba pelarut fosfat sangat menguntungkan untuk pertumbuhan tanaman seperti kedelai (Noor, 2005), jagung (Setiawati *et al.*, 2014), kacang tanah (Prihastuti dan Purwantoro, 2014) karena meningkatkan ketersediaan fosfat yang bisa diserap tanaman. Mikroba yang mampu melarutkan fosfor terfiksasi diantaranya adalah bakteri, fungi dan mikoriza. Kemampuan mikroba dalam melarutkan fosfat tergantung spesies dan medium pengujian. Pada umumnya mikroba pelarut fosfat mempunyai kemampuan melarutkan *tricalcium phosphate* lebih tinggi dibandingkan *rock phosphate* (Panhwar *et al.* 2014). Dengan menggunakan teknik molekuler analisis sekuen gen berdasarkan 16 S rRNA maka Panhwar *et al.* (2014) berhasil mengidentifikasi bakteri pelarut fosfat yang diisolasi dari tanah sulfat asam. Isolat-isolat tersebut adalah *Burkholderia thailandensis*, *Sphingomonas pitulosa* dan *Burkholderia spinalis*. Inkubasi selama 2 hari pada medium yang mengandung tricalcium fosfat, kadar P terlarutnya masing-masing adalah 1455 ppm, 142 ppm dan 146 ppm. Mikroba-mikroba tersebut tidak hanya membantu menyediakan fosfat untuk pertumbuhan tanaman, tetapi juga mengekskresikan eksopolisakarida yang dapat meningkatkan pH serta menghasilkan IAA. Jika pH air meningkat sekitar 5, maka Al terpresipitasi sebagai Al-hidroksida yang inert sehingga tidak mengganggu pertumbuhan padi pada kondisi lapangan.

Istina *et al.* (2015) berhasil mengisolasi dan mengidentifikasi bakteri dan jamur pelarut P dari tanah gambut Riau dengan tingkat kematangan sapris. Berdasarkan analisis gen 16S rRNA bakteri dan jamur yang diisolasi

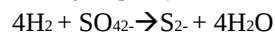
tergolong *Burkholderia gladioli* dan *Penicillium aculeatum*. Selain itu pada umumnya jamur lebih resisten terhadap keasaman yang tinggi dibandingkan bakteri. *Burkholderia* yang berhasil diisolasi menghasilkan asam oksalat (7,504 ppm), asetat (5,253 ppm), butirat (2,163 ppm), dan laktat (4,338 ppm). Aplikasi *Burkholderia gladioli* dan *Penicillium aculeatum* pada bibit sawit dapat meningkatkan serapan P, kadar hara, bobot kering tajuk dan akar tanaman namun tidak berbeda nyata.

Jamur mikoriza arbuskular membentuk hubungan simbiotik dengan akar tanaman dan memperbaiki serapan fosfat dari dalam tanah. Simbiosis ini didasarkan pada pertukaran nutrisi. Tanaman menerima hara dari tanah yang diserap fungi, sedangkan fungi mendapatkan gula sebagai sumber karbon dari tanaman. Fungi arbuskular mikoriza dan ektomikoriza mengkolonisasi sekitar 80% spesies tanaman. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kerapatan spora mikoriza di tanah sulfat asam Thailand adalah 0,232 spora per gram tanah. Berdasarkan analisis filogenetik empat OTUs (operational taxonomic units) diperoleh mikoriza yang tergolong *Glomus*, *Acaulospora*, *Entrophospora* dan 1 spora yang tidak terdeteksi dari akar *Widelia* (Higo *et al*, 2011).

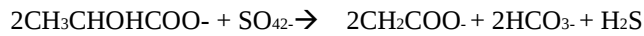
Bakteri pereduksi sulfat, pengoksidasi besi dan pirit

Bakteri pereduksi sulfat termasuk kemoorganotrofik dan tergolong anaerobik obligat. Berdasarkan analisis sekuen rRNA dikelompokkan menjadi 4 group yaitu gram negatif mesofilik, gram positif pembentuk spora, bakteri termofilik dan archaea termofilik. Beberapa genera yang mampu mereduksi sulfat diantaranya adalah *Desulfovibrio*, *Desulfomicrobium*, *Desulfobacter*, *Desulfosarcina*, *Desulfotomaculum*, *Thermodesulfobacterium* dan *Archaeoglobus* (Luptakova, 2007). Berdasarkan proses metabolismenya bakteri pereduksi sulfat, mereduksi sulfat menggunakan substrat organik (laktat, malat dll) gas hydrogen sebagai donor electron dan sulfat sebagai aseptor electron. Menurut Odom dan Singleton (1993), berdasarkan sumber energinya, bakteri pereduksi sulfat digolongkan menjadi 2 tipe respirasi anaerobik yaitu:

- I. Autotrof reduksi sulfat dimana sumber energinya adalah gas hidrogen dan proses reaksi berlangsung beberapa tahap. Secara keseluruhan, proses yang terjadi di ekspresikan menurut persamaan berikut:



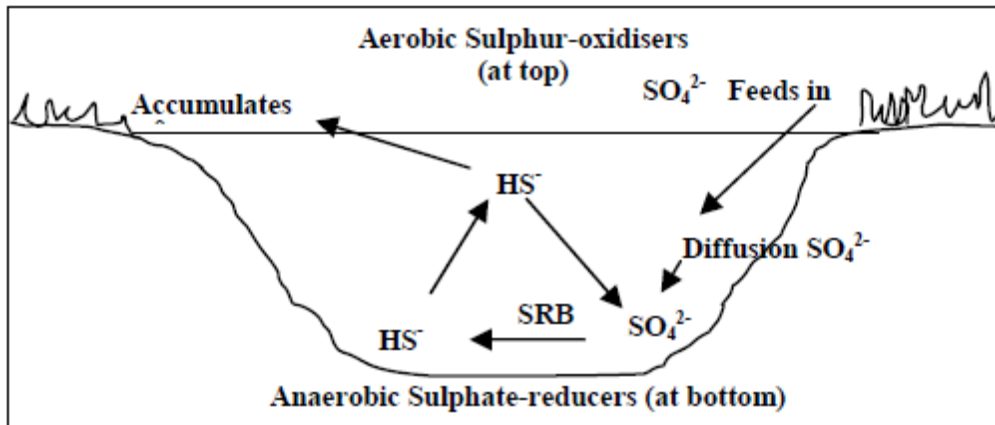
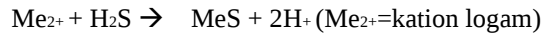
- II. Heterotrof reduksi sulfat, dimana sumber energinya adalah senyawa organik sederhana (laktat, fumarat, piruvat dan beberapa alkohol). Berdasarkan produk akhir dari oksidasi substrat organik diketahui, bahwa;
- Oksidasi heterotrof tidak lengkap dari substrat organik dengan produk akhir asetat, persamaan reaksinya adalah:



- Oksidasi heterotrof lengkap dari substrat organik dengan produk akhir CO_2 dan H_2O , persamaan reaksi adalah:



Pada proses respirasi anaerobik bakteri pereduksi sulfat menghasilkan hidrogen sulfida (H_2S) kemudian dengan mudah bereaksi di dalam medium air dengan kation logam berat membentuk sulfida yang tidak mudah larut, yang persamaannya reaksinya adalah sebagai berikut:



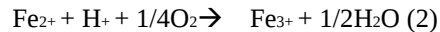
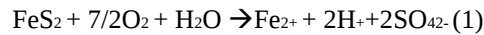
Gambar 1. Skema ilustrasi diagram proses kimia dari sulfur (Dom dan Singleton, 1993).

Berdasarkan Gambar 1, ion sulfat terlarut dan terdifusi ke bagian dasar sistem akuatik, kemudian S_2 direduksi oleh bakteri pereduksi sulfat menghasilkan sulfida. Kemudian sulfida yang terbentuk terdifusi ke bagian atas melalui kolom air menuju lapisan permukaan yang selanjutnya dioksidasi oleh mikroorganisme aerobik membentuk S_0 atau SO_4^{2-} . Oleh karena kelarutannya di dalam air rendah maka SO_0 terpresipitasi membentuk *yellow crust* pada permukaan air dan dipinggir sistem ini (Luptakova, 2007).

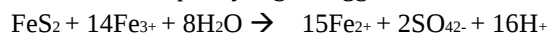
Menurut Koschoreck (2008), bahwa reduksi sulfat dihambat oleh presipitasi metal sulfide dan kompetisi dengan bakteri pereduksi besi. Metal

sulfit yang tidak larut mencegah akses reaktan terhadap sel (Utgikar *et al.*, 2002). Bakteri pereduksi sulfat berkompetisi dengan bakteri pereduksi besi dalam menggunakan donor electron (Stams *et al.*, 2005). Air yang asam seringkali mengandung sulfat dan besi terlarut dengan konsentrasi yang tinggi sedangkan karbon terbatas (Blodau dan Peiffer, 2003).

Pada kondisi aerobik, pirit yang terkandung pada tanah sulfat asam akan teroksidasi. Setiap mol pirit menghasilkan 2 mol ion H^+ dan 16 mol ion H^+ yang masing-masing agen pengoksidasinya adalah oksigen dan Fe^{3+} . Pada awalnya oksidasi pirit oleh molekul oksigen, menghasilkan ion sulfat dan fero (Fe^{2+}) (1). Selanjutnya ion fero (Fe^{2+}) hasil oksidasi pirit bereaksi dengan oksigen dan menghasilkan Fe^{3+} (2). Pada pH yang rendah reaksi ini dikatalisis oleh *Thiobacillus ferrooksidans* dan laju reaksi meningkat sampai 1000 kali. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:



Pada $pH < 4$, Fe^{3+} dalam kondisi terlarut dan dapat bereaksi dengan pirit sehingga menghasilkan ke asaman yang lebih banyak disekitarnya. Reaksi oksidasi pirit yang menggunakan Fe^{3+} sebagai oksidator adalah:



Menurut Phung dan Liew (2017) *Thiobacillus* ada di tanah sulfat asam terutama tanah sulfat asam potensial dan populasinya menurun akibat pemberian bahan amelioran. Bakteri yang terlibat dalam oksidasi pirit adalah *Thiobacillus ferrooxidans* yang mempunyai pH optimal untuk pertumbuhannya < 4 .

Bakteri metanogen dan metanotrof

Bakteri metanogen merupakan komponen penting dari komunitas bakteri yang hidup di lahan rawa. Bakteri metanogen merupakan bakteri anaerobik obligat yang tidak bisa langsung menggunakan polimer yang mempunyai berat molekul tinggi sehingga tergantung micro organisme lain. Sedikitnya ada tiga kelompok mikroorganisme yang terlibat yaitu bakteri hidrolitik, fermentatif dan asetogenik penghasil H_2 (Inglett, *et al.* 2005).

Madigan dan Martinko (2006) In Reddy and DeLaune (2008) menggolongkan metanogen menjadi 3 tipe, berdasarkan substrat yang diubah menjadi metana (CH_4), yaitu: maka Tipe yang menggunakan CO_2 : CO_2 , CO dan format.

1. Tipe yang menggunakan metil: methanol (CH_3OH), metilamin (CH_3NH_3^+), dimetilamin ($(\text{CH}_3)_2\text{NH}_2^+$), trimetilamin ($(\text{CH}_3)_3\text{NH}^+$), metilmerkaptan (CH_3SH), dimetilsulfida ($(\text{CH}_3)_2\text{S}$)
2. Tipe yang menggunakan asetat.

Hasil penelitian Madigan dan Martinko (2006) *In* Reddy and DeLaune (2008) dengan menggunakan sampel yang terbatas, menunjukkan bahwa beberapa bakteri yang terlibat dalam metanogenesis diantaranya adalah:

1. *Methanobacterium* (substrat yang digunakan adalah CO_2 dan format)
2. *Methanococcus* (substrat yang digunakan adalah CO_2 dan format)
3. *Methanothrix* (substrat yang digunakan adalah asetat)
4. *Methanosarcina* (substrat yang digunakan adalah CO_2 , format, metanol, metilamin dan asetat).

Dalam neraca metana secara global, oksidasi metana oleh mikroba pengoksidasi metana merupakan mata rantai yang sangat penting. Bakteri aerobik yang mampu mengoksidasi metan (*methan oxidizing bacteria*/MOB) dengan oksigen disebut metanotrof. Metan digunakan oleh bakteri tersebut sebagai donor elektron untuk menghasilkan energi dan sumber karbon. MOB mempunyai potensi yang besar menurunkan laju emisi CH_4 dari pertanaman padi sawah ke atmosfer (Ferrando dan Tarlera, 2009). Oksidasi CH_4 oleh MOB dikatalisis oleh sMMO (*soluble methane monooxygenase*) dan pMMO (*particulate methane monooxygenase*) (Semrau *et al.*, 2010).

Oksidasi metana terjadi pada interface anaerobik-aerobik dimana oksigen dan metana tersedia : interface tanah-air, tanah rizosfer padi. Oksidasi CH_4 menjadi CO_2 oleh bakteri metanotrof di dalam sawah dapat mencapai 80% dari CH_4 yang diproduksi oleh bakteri metanogen (Conrad dan Rothfus, 1991).

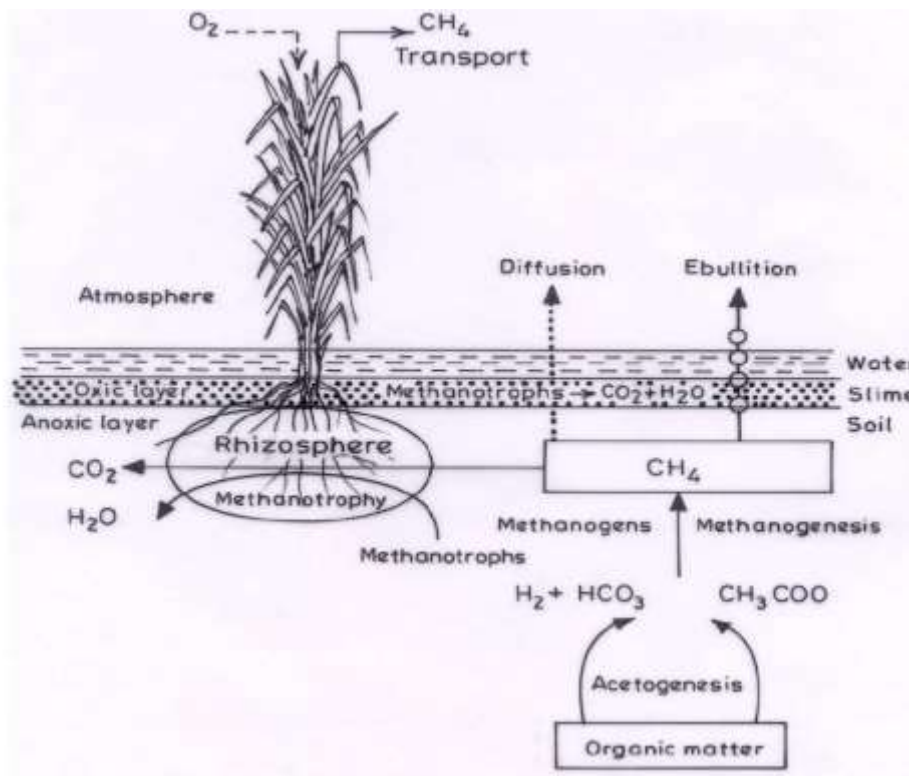
Dubey (2005) membedakan metanotrof menjadi 3 yaitu Type I (γ -Proteobacteria) Type II (α -Proteobacteria) dan Type X. Type I meliputi *Methylomonas*, *Methylocaldum*, *Methylosphaera*, *Methylomicrobium* dan *Methylobacter*. Type II terdiri dari *Methylosystis* dan *Methylosinus*. Sebagian dari *Methylococcus* adalah tergolong Type X. Akhir-akhir ini sebuah bakteri metanotrof acidophilic yang ekstrim dilaporkan tergolong filum Verrucomicrobia, di luar subphylla metanotrof yang sudah ada (Dunfielg *et al.*, 2007).

Metanotrof yang diisolasi dari pertanaman padi termasuk genus *Methylocystis* (Takeda *et al.*, 1988 dalam Mer dan Roger, 2001) dan *Methylosynus*.

Metanotrof Type II yang kemungkinan dominan pada petanaman padi karena tipe ini memproduksi *soluble methane-mono-oxygenase* yang mencegah akumulasi NO_2^- yang bersifat toksik terhadap metanotrof dan mempunyai bentuk resistensi yang lebih efisien dari Type I (Le Meret *et al.*, 1996).

Oksidasi metana oleh metanotrof diawali oleh enzim *methane monooxygenase* (MMO). MMO mempunyai dua bentuk yaitu sMMO (particulate terikat membran) dan bentuk terlarut yaitu Type II dan Type X (Macinelli, 1995).

Menurut Conrad (1999), masalah yang paling besar adalah energi metabolisme untuk aktivasi molekul CH_4 yang *inert*. Ada dua lintasan utama oksidasi CH_4 yaitu katabolik dan anabolik. Pada lintasan katabolik, metanotrof mengoksidasi metana menjadi CO_2 melalui metanol, formaldehida, dan format yang dikatalis oleh enzim *methane monooxygenase*, *methanoldehydrogenase*, *formaldehyde dehydrogenase* dan *formate dehydrogenase*. Pada lintasan ini energi dilepaskan tetapi karbon tidak menjadi biomasa sel. Lintasan anabolik selanjutnya dibedakan lintasan karbon dari metana bergabung menjadi biomasa sel pada level *formaldehyde*. Asam karboksilat dan asam amino merupakan produk intermediat dari lintasan serine. *Serine transhydroxymethylase* adalah enzim *initiator*. Selain itu gula phosphoglycerated merupakan produk antara dari lintasan *ribulose monophosphate*. Lintasan RuMP merupakan lintasan cyclic dalam fiksasi diikuti penghancuran dan penyusunan kembali. Metanotrof Type I dan Type X mengikuti lintasan RuMP semetara lintasan serine diikuti oleh metanotrof Type II dan Type X (Hanson dan Hanson, 1996).



Gambar 2. Skema pembentukan metana oleh bakteri metanogen, oksidasi metana oleh bakteri metanotrof dan emisi metana pada tanaman padi (Dubey, 2005).

Pendekatan Statistik untuk Mempelajari Keragaman Mikroba

Keragaman mikroba merupakan salah satu bidang penelitian yang tidak mudah dipelajari, namun sangat diperlukan untuk mengetahui biogeografi, komunitas dan proses ekologi. Metode yang digunakan untuk meneliti komunitas mikroba melibatkan analisis gen, transkripsi atau fragmentasi genom ekstrak asam nukleat dari contoh tanah. Hasil identifikasi secara molekuler berdasarkan 16S rRNA yang kemudian disejajarkan dengan spesies yang ada di Gen Bank menggunakan program BLAST terhadap 4

isolat bacteria asal tanah sulfat asam, menunjukkan 2 isolat tergolong *Bacillus circulans*, 1 isolat *Paenibacillus* dan 1 isolat tidak teridentifikasi (Annisa dan Lestari, 2016).

Keragaman dapat didekati menggunakan pendekatan statistik dengan menggunakan sampel yang sedikit. Akhir-akhir ini analisis statistik menggunakan populasi genetik dan sistematik serta review dataset mikroba untuk memperkirakan kekayaan spesies dan keragaman filogenetik yang tidak berdasarkan perkiraan keragaman perbedaan sekuen. Index pengulangan Simpson's (I/D), uji F, pengelompokan filogenetik dari taxa (uji P) telah digunakan untuk mengamati keragaman yang telah digunakan secara luas untuk mempelajari ekologi. Penggunaan kombinasi pengayaan dan spesies keragaman spesies memberikan informasi yang mendetail mengenai keragaman mikroba (Das *et al.*, 2006).

Rousk and Baath (2007) menggunakan one-way ANOVA untuk menguji kumulatif pertumbuhan dan respirasi bakteri dan jamur. Apabila sebagai ulangan adalah waktu, maka jumlah ulangan ditentukan sebagai $n-2$ (n =perlakuan). Apabila secara statistik nyata maka digunakan uji lanjut menggunakan kontras.

Penutup

Ekosistem lahan rawa merupakan salah satu habitat untuk beberapa mikroba. Mikroba mempunyai peran yang penting dalam siklus hara yang merupakan bagian penting dalam keseimbangan biologi. Beberapa mikroba penting di lahan rawa antara lain mikroba perombak bahan organik, penambat N, pelarut P, pereduksi sulfat, pengoksidasi besi, metanogenik dan metanotrof. Selain mikroba metanogenik, mikroba-mikroba tersebut bermanfaat dalam memperbaiki kesuburan dan produktivitas lahan rawa. Pengetahuan mengenai pola diversitas mikroba dalam habitat alami sangat penting untuk memprediksi respon ekosistem terhadap perubahan lingkungan. Strategi konservasi ekosistem lahan rawa harus mempertimbangkan sifat fisik, kimia dan ekologi yang dapat menjaga produktivitasnya

Daftar Pustaka

- Agus, F. Dan I. G. M. Subiksa. 2008. Lahan Gambut: Potensi untuk Pertanian dan Aspek Lingkungan. Balai Penelitian Tanah dan World Agroforestry Center (ICRAF). Bogor.
- Aislabie, J. and J. R. Delli. 2013. Soil microbes and their contribution to soil services. In. Dymond, J. R. (ed). Ecosystem services in New Zeland-condition and trends. Manasaki Whemna Press, Lincoln, New Zeland.
- Annisa, W. dan. Y. Lestari. 2016. Identifikasi bakteri anaerobik asal tanah sulfat asam Kalimantan Selatan dengan analisis sekuensing 16S rRNA. Pengembangan potensi sumberdaya lokal berwawasan lingkungan untuk penguatan produk pertanian nasional berdaya saing global. Proseding Seminar Nasional. Fakultas Pertanian Universitas Muhammadiyah Purwokerto. Hlm. 69-76.
- Behera, B. C., R. R. Mishra, S. K. Dutta and H. N. Thatoi. 2014. Sulphur oxidizing bacteria in mangrove ecosystem: A review. *African Journal of Biotechnology*. 13(29):2897-2907.
- Blodau, C and S. Peiffer. 2003. Thermodynamics and organic matter: concentration on neutralization processes in sedimen of highly acidic water. *Appl. Geochem.* 18:25-36.
- Chadirin, Y., S. K. Saptono, Rusdiyanto dan K. Osawa. 2016. Lingkungan Biofisik dan emisi gas CO₂ lahan gambut untuk produksi biomasa berkelanjutan. *Jurnal ilmu Pertanian Indonesia*. 21(2):146-151.
- Conrad, R. 1999. Soil microorganisms oxidizing atmospheric trace gasses (CH₄, CO₂, H₂, NO). *Indian Journal of Microbiology*. 39:193-203.
- Conrad, R and F. Rothfus. 1991. Methane oxidation in the soil surface layer of flooded rice field and the effect of ammonium. *Biol Fertil Soil*. 12:28-32.
- Das, S., P. S. Lyla and S. A. Khan. 2006. Marine microbial diversity and ecology:importance and future perspectives. *Current Science*. 90(10):1325-1335.
- Dubey, S. K. 2005. Microbial ecology of methane emission in rice agroecosystem: a review. *Applied Ecology and Environmental Research*. 3(2):1-27.
- Dunfield, P. F., A. Yuyev, P. Senin, A. V. Smirnova, M. B. Stott, S. Ly. B. Hou, J. H. Saw, Z. Zhou, Y. Ren, J. Wang, B. W. Mountain, M. A. Crowe, T. M. Weatherby, P. L. Bodelier, W. Liesack, L. Feng, L. Wang, and M. Alam. 2007. Methane oxidation by extremely acidophilic bacterium of the phylum Verrucomicrobia. *Nature*. 450(7171):879-882.
- Ferrando, L. and S. Tarlera. 2009. Activity and diversity of metanotrophs in the soil-water interface and rhizospheric soil from a flooded temperate rice field. The Society for Applied Microbiology, *Journal of Microbiology*. 106:306-316.

- Howard, R. L., E. Abotsi, E. L. J. van Resburg and S. Howard. 2003. Review: Lignocellulose biotechnology: issue of bioconversion and enzyme production. *African Journal of Biotechnology*. 2(12):602-619.
- Ginting, C. B., R. Saraswati and E. Husen. 2006. Mikroorganisme Pelarut Fosfat. In. Simanungkalit, R. D. M., D. A. Suriadikarta, R. Saraswati, D. Setyorini & W. Hartatik. (editor). Pupuk Organik dan Pupuk hayati. Balai besar Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Hadi, A., L. Fatah, D. N. Affandi, R. A. Bakar and K. Inubushi. 2012. Population and genetic diversities of bacteria related to nitrous oxide and methane in peat soils of south Kalimantan, Indonesia. *Malaysian Journal of Soil Science*. 16:121-135.
- Hanson, R. and T. E. Hanson. 1996. Methanotrophic Bacteria. *J. Microbiol reviews* 60: 439-471.
- Higo, M., K. Isobe and D. J. Kag. 2011. Molecular diversity and spora density of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi in acid sulfate soil in Thailand. *Annals Microbiology*. 61:383-389.
- Inglett, P. W., K. R. Reddy and R. Corstanja. 2005. Anaerobic Soils. Elsevier Ltd.
- Istina, I. N., H. W. Widiastuti, B. Joy and M. Antralina. 2015. Phosphate Solubilizing Microbe from Saprist Peat Soils and their potency to enhance oil palm growth and P. uptake. *Procedia Food Science*. 3:426-435.
- Koesnandar, H. and N. Nurhayati. 2008. Recent development in the bioconversion of lignocelluloses into ethanol. *Microbiology Indonesia*. 2(3):101-102.
- Koschorreck, M. 2008. Microbial sulphate reduction at a low pH. *FEMS Microbiol Ecol* . 64:329-342. (Minireview).
- Lamid, M. 2010. Evaluasi pencernaan bahan organik dan serat kasar pada jerami padi menggunakan bakteri selulolitik. Prosiding National Conference on Green Technology for Better Foliar.
- Lal, L. 2002. Phosphate Biofertilizers. Agrotech Publ. Academy, Udupur India. 224 p. In. Suliasih dan Rahmat. 2006. Aktivitas fosfatase dan pelarutan kalsium fosfat oleh beberapa bakteri pelarut fosfat. *Biodiversitas*. 8(1):23-26.
- Le Mer, J., S. Escoffier, C. Chessel, P. A. Roger. 1996. Microbiological aspects of methane emission by rainfield soil from Camargue (France); 2 Methanotrophy and related microflora. *Eur J. Biol*. 32:71-80.
- Lestari, Y dan Mukhlis. 2008. Populasi bakteri pelarut fosfat di tanah sulfat asam potensial. Prosiding Seminar nasional Pengembangan Lahan Rawa. Kerjasama Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian dengan Badan Penelitian dan Pengembangan Daerah Provinsi Kalimantan Selatan, Banjarbaru, 5 Agustus 2008. 294-299.

- Lestari, Y. 2016. Reklamasi Total dan Ameliorasi Tanah Sulfat asam Potensial Kalimantan selatan untuk Budidaya Jagung. Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta. Disertasi.
- Luptakova, A. 2007. Importance of sulphate-reducing bacteria in environment. *Nova Biotechnologica*. 8(1):17-22.
- Madigan, M. and J. Martinko. 2006. Brock Biology of Microorganisms. 11th edition. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. In K. R. Reddy and R. D. DeLaune. 2008. Biogeochemistry of Wetlands. CRC Press. New York.
- Mancinelli, R. L. 1995. The regulation of methane oxidation in soil. *Ann. Rev. Microbiol.* 49:581-605.
- Manucharova, N. A. 2009. The microbial destruction of chitin, pectin and cellulose in soils. *Eurasians Soil science*. 42(15):1526-1532.
- Martani, E., S. Margino, D. Indradewa and A. Supriyo. 2011. Isolation and selection of rhizobium tolerant to pesticides and aluminium from acid soils in Indonesia. *J. Trop. Soils*. 16(1):47-54.
- Mer, L. Le, and P. Roger. 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *Eur. J. Soil Biol.* 37:25-50.
- Mukhlis and Y. Lestari. 2011. Effects of biofertilizer "M-Star" on land productivity and growth of sweet corn in acid sulphate soil of swampland. *Agrivita*. 3:242-248.
- Najiyati, S dan L. Muslihat. 2015. Seri Pengelolaan Hutan dan Lahan Gambut: Mengenal Tipe Lahan Rawa Gambut. Wetlands international- Indonesia Progame. <http://www.indo-peat.net>. Diakses 16 November 2015.
- Nannipieri, P., J. Ascher, M. T. Ceccherini, L. Landi, G. Pietramellara and G. Renella. 2017. Microbial diversity and soil function. *European Journal of Soil Science*. 68:1-26.
- Noor, A. 2005. Peranan fosfat alam dan kombinasi bakteri pelarut fosfat dengan pupuk kandang dalam meningkatkan serapan hara dan hasil kedelai. *Jurnal Tanah dan Lingkungan*. 7(2):4-47.
- Odom, J. M. & J. R. R. Singleton. 1993. The Sulfate-reducing bacteria: Contemporary Perspectives. Springer-Verlag. New York.
- Pandey, A. K., N. Das, M. Kumar, A. S. Rao. 2015. Methanogens in the environment: an insight of methane yield and impact on global climate change. *International Letters of Natural Science*. 37:41-60.
- Panhwar, Q. A., U. A. Naher, U. A. Naher S. Jusop, R. Othman, M. A. Latif and M. R. Ismail. 2014. Biochemical and molecular characterization of potential phosphate-solubilizing bacteria in acid sulfate soils and their beneficial effects on rice growth. *PLOS ONE*. 9(Issue 10):1-14.
- Perez, J., J. Munoz-Dorado. T. de Is Rubin and Martinez. 2002. Biodegradation and biological treatment of cellulose, hemicelluloses and lignin: an overview. *Int. Microbiology*. 5:53-63.

- Phung, N. T. T. And P. Liew. 2017. Microbiological characteristic of acid sulphate soils: a case study in Ho Chi Minh City environs. www2.alterra.wur.nl/Internet/webdocs/ilri-publicaties/publicaties/Pub53/Pub53-h12.pdf.
- Prihastuti dan Purwantoro. 2014. Kajian kegunaan pupuk hayati kemasan untuk kacang tanah di lahan kering asam Lampung.
- IPPC. 2007. Climate change 2007. The physical science basis . In Contribution of working group I to Forth Assesment Report of the Intergovernmental Panel on Climate change (IIP S. Solomon, D. Qin, M. Maning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt (eds). Cambridge, U. K. and New York, N. Y. USA. Cambridge University Press.
- Ponmurugan, P. and C. Gopi. 2006. In vitro production of growth regulators and phosphatase activity by phosphate solubilizing bacteria. *Afri. J. Biotech.* 5(4):348-350.
- Razie, F. 2003. Karakteristik Azotobacter spp. dan Azospirillum spp dari padi sawah di daerah dataran banjir Kalimantan Selatan dan pengaruhnya terhadap pertumbuhan awal tanaman padi. Fakultas Pasca Sarjana. Institut Pertanian Bogor.(Tesis).
- Razie, F. and I. Anas. 2005. Potensi Azotobacter spp. dari lahan pasang surut Kalimantan Selatan dalam menghasilkan Indol Acetic Acid (IAA). *Jurnal Tanah dan Lingkungan.* 7(1):35-39.
- Rezanezhed, F., J. S. Price, W. Q. Quinton, B. Lennartz, T. Milojevic and P. V. Cappellen. 2016. Structure of peat soils and implications for water storage, flow & solute transport: A review update for geochemists. *Chemical Geology.* 429:75-84.
- Roslan, M. A. M., N. A. Amirudin, Z. A. Z. Abidin and S. M. Omar. 2015. Isolation of bacteria from the acidic peat swamp forest soil and their lignin degradation potential. *Jurnal Teknologi (Science & Engineering).* 77(24):77-81.
- Rousk, J and E. Baath. 2007. Fungal and bacterial growth in soil with plant materials of different C/N ratios. *FEMS Microbiol. Ecol.* 62:258-267.
- Sabiham, S. 2006. Pengelolaan Lahan Gambut Indonesia Berbasis Keunikan Ekosistem. Orasi Ilmiah Guru Besar Tetap pengelolaan Tanah. Fakultas Pertanian. Institut Pertanian Bogor.
- Sahoo, K and N. K. Dahl. 2009. Potential microbial diversity in mangrove ecosystems:A review. *Indian Journal of Marine Science.* 38(2):249-256.
- Sato, A., T. Watanabe, Y. Unno, E. Purnomo, M. Osaki and T. Shinane. 2009. Analysis of diversity of diazotrophic bacteria associated with the rhizosphere of a tropical Arbor, *Melastoma malabathricum* L. *Microbiol Environ.* 24(2):81-87.
- Semrau, D. J., Dispirto, A. A. and Yoos. 2010. Methanotrophs and Copper. *FEMS. Microbiol Review.* 34:446-531.

- Setiawati, T. C. dan P. A. Mihardja. 2008. Identifikasi dan kuantifikasi metabolit bakteri pelarut fosfat dan pengaruhnya terhadap aktivitas *Rhizoctonia solani* pada tanaman kedelai. *J. Tanah Trop.* 13(3):233-240.
- Setiawati, M. R., P. Suryatmana, R. Hindersah, B. N. Fitriatin and D. Herdiyanto. 2014. Karakterisasi isolate bakteri pelarut fosfat untuk meningkatkan ketersediaan P pada media kultur cair tanaman jagung (*Zea mays*, L). *Bionatura Jurnal Ilmu-Ilmu Hayati dan Fisik.* 16(1):30-34.
- Stams, A. J. M., C. M. Plugge, F. A. M. De Bok, B. H. G. W. van Houten H. Lens P. Djikman and J. weijma. 2005. Metabolic interaction in mrthanogenic and sulfate-reducing bioreactors. *Water Sci. Technol.* 52:13-20.
- Treseder, K. K., S. N. Kivlin and C. V. Hawkes. 2011. Evolutionary trade-offs among decomposers determine responses to nitrogen enrichment. *Ecology Letters.* 14:933-938.
- Utgikar, V. P. S. M. Harmon, N. Chaudhary, H. H. Tabak, R. Govind and J. R. Haines. 2002. Inhibition of sulfate-reducing bacteria by metal sulfide formation in bioremediation of acid mine drainage. *Environ Technol.* 17:40-48.
- Wizna, H. Abbas, Y. Rizal, A. Dharma and I. Putu Kompiang. 2007. Selection and Identification of Cellulase-Producing Bacteria Isolated from the litter of Mountain and swampy Forest. *Microbiology Indonesia.* 1(3):135-139.