

# MIKROBA TANAH RAWA DAN PEMANFAATANNYA SEBAGAI BIOFERTILIZER DAN BIOREMEDIATOR

*Mukhlis*

*Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa*

## RINGKASAN

Lahan rawa termasuk lahan suboptimal karena bersifat masam, miskin hara baik makro maupun mikro, dan mengandung senyawa (Al, Fe, H<sub>2</sub>S) yang bersifat racun. Namun lahan ini memiliki keanekaragaman hayati yang tinggi, termasuk mikroba tanah. Banyak mikroba tanah lahan rawa yang mampu memperbaiki sifat fisik, kimia, dan kesuburan tanah untuk pertumbuhan tanaman. Upaya memperbaiki daya dukung tanah dapat dilakukan dengan mengaktifkan peranan mikroba tanah *indigenous* (lokal) atau introduksi. Mikroba yang berada di rhizosfer dapat membantu mengoptimalkan penyediaan hara. Beberapa fungi dan bakteri dapat berperan merombak bahan organik, menambat N, dan melarutkan P. Mikroba yang berada di permukaan dan dalam tanah sebagai perantara dalam reaksi kimia secara metabolik dapat mengurangi dampak negatif kontaminasi logam berat dengan mengubah senyawa kimia kompleks atau sederhana menjadi bentuk yang tidak berbahaya. Pemanfaatan bakteri pereduksi sulfat dapat meningkatkan pH sehingga dapat memperbaiki ketersediaan hara dan mengurangi senyawa beracun. Penggunaan biofertilizer dan bioremediator dapat mendukung program kelestarian lahan dan penyelamatan ekosistem yang akan menunjang keberlanjutan produktivitas lahan pertanian.

## A. PENDAHULUAN

Mikroba memiliki peranan penting dalam bidang pertanian. Berdasarkan fungsi metabolisme dan manfaatnya, mikroba tanah dapat dikelompokkan menjadi dua (1) bersifat merugikan dan (2) menguntungkan. Mikroba yang merugikan mencakup virus, fungi, dan bakteri sebagai patogen penyebab penyakit atau kompetitor dalam penyerapan hara. Sedangkan mikroba yang

menguntungkan adalah sejumlah fungi, bakteri, dan aktinomisites yang mempunyai kemampuan dan fungsi metabolisme menguntungkan bagi pertumbuhan dan produksi tanaman. Menurut Hanafiah *et al.* (2005), bahwa mikroba mempunyai kontribusi dalam produksi dan kesehatan tanaman terkait dengan: (1) mikroba berperan penting dalam dekomposisi bahan organik (limbah pertanian dan hewan), yang apabila dikelola dengan baik sudah tentu akan meminimalkan atau bahkan meniadakan penggunaan pupuk kimia buatan yang diketahui berdampak negatif terhadap kesehatan lingkungan bila digunakan berlebihan; (2) merangsang pertumbuhan tanaman melalui kemampuan beberapa mikroba dalam menghasilkan zat-zat perangsang tumbuh, seperti vitamin, hormon, asam-asam amino, dan senyawa organik lainnya, dan (3) menghambat perkembangan patogen tanaman, yaitu melalui sifat antagonis dan kompetitif dalam pemanfaatan nutrisi atau melalui produksi senyawa toksik antipatogen (biopestisida).

Akhir-akhir ini perhatian terhadap pemanfaatan mikroba yang menguntungkan semakin meningkat. Hal ini dipicu oleh pengalaman buruk pada saat dilaksanakan revolusi dibidang pertanian atau dengan istilah revolusi hijau. Intensifikasi pertanian melalui revolusi hijau menitik-beratkan pada penggunaan pestisida dan pupuk kimia. Sistem pertanian berubah dari pertanian tradisional yang sangat memperhatikan keseimbangan ekosistem dan memelihara keanekaragaman hayati menjadi pertanian modern yang hanya berorientasi pada pertimbangan ekonomi semata. Tingginya produktivitas akibat penggunaan pupuk kimia yang dapat memenuhi kebutuhan hara tanaman secara lengkap dan kemampuan pestisida yang dapat membasmi hama penyakit tanaman menyebabkan petani selalu tergantung pada kedua jenis bahan tersebut dan tidak lagi mengikuti prinsip keseimbangan alam.

Meskipun revolusi hijau sangat berjasa bagi kehidupan manusia terutama dalam pemenuhan kebutuhan pangan, ternyata menimbulkan bencana terhadap kelestarian lingkungan hidup dan kesehatan manusia. Pupuk kimia yang mempunyai kemampuan tinggi dalam memacu pertumbuhan tanaman, ternyata mempunyai efek merusak tanah. Penggunaan pupuk kimia yang terus menerus telah merubah struktur tanah yang secara alami remah menjadi *bantat* (sangat keras) dan selanjutnya berdampak pada kehidupan mikroba di dalamnya. Demikian juga dengan pestisida kimia berdampak pada tercemarnya lingkungan yang mengakibatkan aktivitas berbagai mikroba tanah menjadi terganggu bahkan mengalami kematian. Media tempat hidup organisme tersebut tercemar oleh senyawa kimia yang tetap bertahan hingga bertahun-tahun. Dampak lain dari residu pupuk dan pestisida kimia yang merupakan senyawa *carcinogenic* dapat merusak saraf dan menimbulkan kanker.

Lahan rawa termasuk lahan suboptimal karena bersifat masam, miskin hara baik makro maupun mikro, dan mengandung senyawa (Al, Fe, H<sub>2</sub>S) yang

bersifat racun. Sebagian tanah rawa berupa gambut yang miskin hara makro (N, P, K, Ca, Mg), hara mikro (Cu, Zn, B, Mo) dan daya sangga rendah. Pada tanah sulfat masam ditemukan lapisan pirit ( $\text{FeS}_2$ ) yang apabila kondisi tergenang bersifat stabil, namun apabila teroksidasi memunculkan masalah, antara lain kemasaman tanah ( $\text{pH} < 3,5$ ), kahat hara, dan keracunan Al, Fe dan  $\text{H}_2\text{S}$  (Dent, 1986). Permasalahan yang timbul akibat proses pemasaman adalah apabila senyawa atau unsur yang beracun di atas tidak terbuang dari lingkungan perakaran, maka pertumbuhan tanaman terhambat.

Pemanfaatan mikroba sebagai biofertilizer dan bioremediator belum sepenuhnya berkembang di lahan rawa, meskipun diyakini mikroba telah banyak berperan dalam sistem usaha pertanian. Biofertilizer dan bioremediator merupakan alternatif untuk meningkatkan kesuburan tanah, efisiensi pemupukan anorganik, produktivitas tanaman dan mengurangi bahaya pencemaran lingkungan.

Uraian berikut mengemukakan mikroba yang berperan dalam penyediaan hara tanaman, pengurai bahan organik, dan agen remediasi dalam mendukung pertanian di lahan rawa.

## **B. MIKROBA TANAH SEBAGAI BIOFERTILIZER**

Peran dan fungsi mikroba tanah sangat menentukan berhasilnya keberlanjutan sistem produksi pertanian. Mikroba tanah bertanggungjawab pada berbagai transformasi hara dalam tanah yang berhubungan dengan kesuburan dan kesehatan tanah (Kennedy dan Papendick, 1995). Aktivitas mikroba dalam tanah dapat menyebabkan terjadinya perubahan fungsi biokimia tanah seperti pelarutan (solubilisasi), pengikatan (fiksasi), mineralisasi, immobilisasi, oksidasi dan reduksi. Oleh karena itu, belakangan ini banyak mikroba yang dimanfaatkan untuk memperbaiki struktur tanah, seperti untuk penggemburan dan pencampuran tanah, serta perombakan bahan organik bagi perbaikan kesuburan tanah.

Mikroba yang berada di rhizosper dapat membantu mengoptimalkan penyediaan hara. Beberapa fungi dan bakteri dapat berperan merombak selulosa, menambat N, dan melarutkan P. Mikroba yang berada di permukaan dan dalam tanah sebagai perantara dalam reaksi kimia secara metabolik dapat mengurangi dampak negatif kontaminasi logam berat dengan mengubah senyawa kimia kompleks atau sederhana menjadi bentuk yang tidak berbahaya. Manfaat yang dapat diperoleh dari penggunaan mikroba sebagai biofertilizer antara lain: (1) menyediakan sumber hara bagi tanaman; (2) melindungi akar dari gangguan hama dan penyakit; (3) menstimulir sistem perakaran agar berkembang sempurna memperpanjang usia akar; (4) memacu mitosis jaringan meristem pada titik tumbuh pucuk, kuncup bunga, dan stolon; (5)

sebagai penawar racun beberapa logam berat; (6) sebagai metabolit pengatur tumbuh; dan (7) sebagai bioaktivator perombak bahan organik, sehingga mikroba disebut sebagai bioregulator (pengatur biologis) tanah (Saraswati *et al.*, 2007). Menurut Gunalan (1996) mikroba tanah berperan dalam (1) penyedia hara, (2) peningkatan ketersediaan hara, (3) pengendali organisme pengganggu tanaman, (4) pengurai bahan organik dan pembentuk humus, (5) pemantap agregat tanah, dan (6) perombak senyawa agrokimia.

Prinsip penggunaan biofertilizer memperbanyak populasi mikroba terpilih sehingga mampu bersaing dengan mikroba lokal (*indigenous*). Invasi dan kolonisasi awal dari biofertilizer yang di introduksi dalam jumlah banyak dan bermutu unggul akan memenangkan kompetisi dengan mikroba lokal sehingga mempunyai kesempatan untuk membantu penyediaan hara dan pertumbuhan tanaman. Pengaruh biofertilizer dalam membantu pertumbuhan dan perlindungan tanaman dapat bersifat langsung dan tidak langsung. Pengaruh langsung antara lain dalam penambatan N dan percepatan pertumbuhan tanaman dengan menghasilkan fitohormon (asam indol asetat, sitokinin, giberelin), dan pelarutan P yang terikat menjadi tersedia melalui reaksi asam-asam organik dan enzim yang dihasilkannya. Sedangkan pengaruh tidak langsung antara lain percepatan perombakan bahan organik dengan menghasilkan enzim selolitik.

### **Mikroba perombak bahan organik**

Percepatan perombakan bahan organik memerlukan bioaktivator yang terdiri dari fungi, aktinomisites, dan bakteri. Fungi terdapat di setiap tempat terutama di darat dalam berbagai bentuk, ukuran dan warna. Pada umumnya fungi mempunyai kemampuan yang lebih baik dibandingkan bakteri dalam merombak sisa tanaman (hemiselulosa, selulosa, dan lignin). Bakteri perombak memanfaatkan senyawa organik dari sisa tanaman yang mati sebagai substrat dan sumber energi.

Bahan 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. Bahan organik juga dapat berfungsi mempertahankan suasana reduktif dan menekan oksidasi pirit di lahan rawa. Proses reduksi ditentukan oleh bahan organik tanah sebagai sumber proton. Kadar bahan organik mempunyai korelasi positif dengan produktivitas tanah (Prihatini *et al.*, 1996).

Sumber bahan organik dapat berasal dari limbah pertanian, limbah kota dan industri (Kurnia *et al.*, 2001). Namun bahan organik tersebut pada umumnya tidak dapat digunakan langsung karena mengandung rasio C/N yang tinggi sehingga memerlukan proses dekomposisi yang relatif lama. Bahan

organik jerami, jaringan daun dan kayu segar mempunyai rasio C/N masing-masing 50-70, 50-60, dan > 400 (Setyorini *et al.*, 2012).

Proses perombakan bahan organik dapat berlangsung pada kondisi aerob dan anaerob. Pengomposan aerob merupakan proses pengomposan bahan organik dengan menggunakan  $O_2$ , dimana hasil akhirnya selain berupa sel hidup juga produk metabolisme berupa  $CO_2$ ,  $H_2O$ , panas, unsur hara, dan sebagian humus. Sedangkan hasil pengomposan anaerob terutama berupa  $CH_4$  dan  $CO_2$  dan sejumlah hasil antara, yaitu timbul bau busuk karena adanya  $H_2S$  dan sulfur organik. Prinsip pengomposan adalah untuk menurunkan rasio C/N bahan organik hingga sama dengan rasio C/N tanah (< 20). Semakin tinggi rasio C/N bahan organik maka proses pengomposan atau perombakan bahan organik semakin lama (Gambar 61).

Mekanisme perombakan melibatkan enzim ekstraseluler yang dihasilkan oleh mikroba berupa enzim selulase yang mampu memutus ikatan  $\beta$ -1-4 glikosidik dalam molekul selulosa, selodekstrin, selobiosa, dan turunan selulosa. Pada umumnya enzim ini diklasifikasikan menjadi tiga kelompok tergantung spesifisitas dalam menghidrolisis selulosa, yaitu endoglukanase, eksoglukanase, dan  $\beta$ -glukosidase. Endoglukanase merupakan komponen selulase yang selalu ditemukan pada mikroorganisme selulolitik baik fungi maupun bakteri. Enzim ini memiliki afinitas yang tinggi terhadap turunan selulosa tersebut dengan aksi endo dan bereaksi secara acak pada serat selulosa yang memiliki kristalinitas rendah (Ilmen *et al.*, 1997; Darwis *et al.*, 1997). Eksoglukanase merupakan kelompok enzim yang lebih dikenal dengan selobiohidrolase. Enzim ini menghasilkan produk hidrolisis utamanya adalah selobiosa (Takasima *et al.*, 1996).  $\beta$ -glukosidase merupakan enzim hidrolitik bereaksi terhadap berbagai senyawa dengan ikatan  $\beta$ -D-glikosidik. Enzim selulase yang dihasilkan dari tiga isolat bakteri *Bacillus* sp. (BRT-1, BTB-1, dan SJSK-2) lahan rawa pasang surut dapat bekerja dalam suasana asam hingga netral (pH 3,0–9,0) dan suhu antara 30-90 °C (Nur, 2010).

*Trichoderma* merupakan salah satu mikroba yang berpotensi tinggi sebagai perombakan bahan organik. Enzim selulase yang dihasilkan *Trichoderma* memiliki komponen enzim yang lengkap, yaitu  $c_1$  (*selobiohidrolase*) yang aktif menghidrolisis selulosa alami,  $c_x$  (*endoglukanase*) yang aktif merombak selulosa terlarut seperti CMC (*carboxyl methyl cellulose*), dan  $\beta$ -glukosidase. Ketiga komponen tersebut bekerja secara sinergistik dalam memecah kompleks substrat.

Hasil penelitian Mukhlis *et al.* (2010) mendapatkan 71 isolat *Trichoderma* dari berbagai lokasi lahan sulfat masam Kalimantan dan spesies yang dominan adalah *T. harzianum* (61,97%), diikuti oleh *T. viride* (22,59%) dan *koningii* (15,49%) (Tabel 34). Hasil pengujian dari 10 isolat *Trichoderma* menunjukkan bahwa inokulasi *Trichoderma* selama 2 minggu pada jerami

padi menghasilkan C/N ratio 19,04–22,84, sedangkan tanpa *Trichoderma* dihasilkan 34,24 (Tabel 35). Hasil tersebut menunjukkan bahwa isolat-isolat di atas sangat berpotensi sebagai komponen biofertilizer yang adaptif di lahan sulfat masam (Gambar 62).

Tabel 34. Spesies *Trichoderma* yang diisolasi dari berbagai lokasi di lahan sulfat masam Kalimantan

Kode	Nama spesies	Asal	Kode	Nama spesies	Asal
T1	<i>T. harzianum</i>	Kalsel	T37	<i>T. harzianum</i>	Kalteng
T2	<i>T. harzianum</i>	Kalsel	T38	<i>T. harzianum</i>	Kalteng
T3	<i>T. harzianum</i>	Kalsel	T39	<i>T. koningii</i>	Kalteng
T4	<i>T. viride</i>	Kalsel	T40	<i>T. harzianum</i>	Kalteng
T5	<i>T. harzianum</i>	Kalsel	T41	<i>T. viride</i>	Kalteng
T6	<i>T. viride</i>	Kalsel	T42	<i>T. harzianum</i>	Kalteng
T7	<i>T. viride</i>	Kalsel	T43	<i>T. koningii</i>	Kalteng
T8	<i>T. harzianum</i>	Kalsel	T44	<i>T. harzianum</i>	Kalteng
T9	<i>T. harzianum</i>	Kalsel	T45	<i>T. koningii</i>	Kalteng
T10	<i>T. harzianum</i>	Kalsel	T46	<i>T. koningii</i>	Kalteng
T11	<i>T. koningii</i>	Kalsel	T47	<i>T. harzianum</i>	Kalteng
T12	<i>T. koningii</i>	Kalsel	T48	<i>T. harzianum</i>	Kalteng
T13	<i>T. harzianum</i>	Kalsel	T49	<i>T. harzianum</i>	Kalteng
T14	<i>T. harzianum</i>	Kalsel	T50	<i>T. viride</i>	Kalteng
T15	<i>T. harzianum</i>	Kalsel	T51	<i>T. harzianum</i>	Kalteng
T16	<i>T. harzianum</i>	Kalsel	T52	<i>T. koningii</i>	Kalteng
T17	<i>T. harzianum</i>	Kalsel	T53	<i>T. harzianum</i>	Kalteng
T18	<i>T. viride</i>	Kalsel	T54	<i>T. viride</i>	Kalteng
T19	<i>T. harzianum</i>	Kalsel	T55	<i>T. viride</i>	Kaltim
T20	<i>T. viride</i>	Kalsel	T56	<i>T. harzianum</i>	Kaltim
T21	<i>T. harzianum</i>	Kalsel	T57	<i>T. viride</i>	Kaltim
T22	<i>T. harzianum</i>	Kalsel	T58	<i>T. viride</i>	Kaltim
T23	<i>T. harzianum</i>	Kalsel	T59	<i>T. harzianum</i>	Kaltim
T24	<i>T. harzianum</i>	Kalsel	T60	<i>T. harzianum</i>	Kaltim
T25	<i>T. koningii</i>	Kalsel	T61	<i>T. harzianum</i>	Kalbar
T26	<i>T. viride</i>	Kalsel	T62	<i>T. harzianum</i>	Kalbar
T27	<i>T. harzianum</i>	Kalsel	T63	<i>T. harzianum</i>	Kalbar
T28	<i>T. harzianum</i>	Kalsel	T64	<i>T. harzianum</i>	Kalbar
T29	<i>T. viride</i>	Kalsel	T65	<i>T. harzianum</i>	Kalbar
T30	<i>T. harzianum</i>	Kalsel	T66	<i>T. harzianum</i>	Kalbar
T31	<i>T. koningii</i>	Kalsel	T67	<i>T. koningii</i>	Kalbar
T32	<i>T. viride</i>	Kalsel	T68	<i>T. koningii</i>	Kalbar
T33	<i>T. harzianum</i>	Kalteng	T69	<i>T. harzianum</i>	Kalbar
T34	<i>T. harzianum</i>	Kalteng	T70	<i>T. viride</i>	Kalbar
T35	<i>T. viride</i>	Kalteng	T71	<i>T. harzianum</i>	Kalbar
T36	<i>T. harzianum</i>	Kalteng			

Sumber: Mukhlis et al. (2010)

Tabel 35. C/N ratio jerami padi setelah diinokulasi *Trichoderma* selama 2 minggu

Spesies	C (%)	N (%)	C/N
<i>T. harzianum</i>	41.05	1.96	20.94
<i>T. harzianum</i>	39.85	1.96	20.33
<i>T. harzianum</i>	40.66	2.10	19.36
<i>T. harzianum</i>	40.46	1.90	21.29
<i>T. koningii</i>	40.65	1.96	20.74
<i>T. koningii</i>	41.10	1.96	20.97
<i>T. koningii</i>	41.58	1.82	22.84
<i>T. koningii</i>	40.89	1.96	20.86
<i>T. viride</i>	42.53	2.10	20.25
<i>T. viride</i>	39.64	1.90	20.86
<i>T. viride</i>	40.86	1.96	20.84
<i>T. harzianum</i>	41.43	2.10	19.72
<i>T. harzianum</i>	39.99	2.10	19.04
<i>T. harzianum</i>	40.36	1.96	20.59
Kontrol	54.79	1.60	34.24

Sumber: Mukhlis et al. (2010)



Gambar 61. Proses pengomposan dengan *Trichoderma* sp (kiri) dan hasil kompos jerami padi (kanan) Foto: Mukhlis



Gambar 62. Fungi *Trichoderma* spp (kiri) dan penampilan padi yang diberi kompos jerami padi dengan *Trichoderma* sp (kanan) (Foto: Mukhlis)

### Mikroba penambat nitrogen

Mikroba penambat N diketahui dapat meningkatkan ketersediaan N bagi pertumbuhan tanaman (Khalid *et al.*, 2004). Ada beberapa jenis bakteri penambat N yang berasosiasi dengan perakaran tanaman. Menurut James dan Olivares (1997) bakteri penambat N di daerah perakaran dan bagian dalam jaringan tanaman padi, yaitu *Pseudomonas* spp., *Enterobacteriaceae*, *Bacillus*, *Azotobacter*, *Azospirillum* dan *Herbaspirillum* telah terbukti mampu meningkatkan secara nyata penambatan N. Sedangkan Waksman (1952) menyatakan bahwa kemampuan penambatan N tergantung sumber energinya, nitrogen yang terpakai, status mineral, kemasaman tanah, faktor lingkungan yang lain, dan kehadiran bakteri tertentu. Selain itu, faktor-faktor eksternal yang juga mempengaruhi antara lain suhu, kelembaban tanah, pH tanah, sumber karbon, cahaya dan pemupukan nitrogen. Trolldenier (1977) menyatakan bahwa aktivitas penambatan N dipengaruhi oleh jumlah bakteri, potensial redoks dan konsentrasi oksigen.

*Azospirillum* merupakan salah satu mikroba penambat N yang mempunyai potensi besar untuk dikembangkan sebagai biofertilizer. Bakteri ini banyak berasosiasi dengan jenis tanaman rerumputan antara lain sereal, jagung, dan gandum. Ada tiga spesies *Azospirillum* yang mempunyai kemampuan sebagai penambat N, yaitu *Azospirillum brasilense*, *A. lipoferum*, dan *A. amazonense* (Sutanto, 2002). Bakteri ini merupakan salah satu jenis mikroba di daerah perakaran. Infeksi yang disebabkan oleh bakteri ini dapat meningkatkan jumlah akar rambut dan peran percabangan akar dalam penyerapan hara, namun tidak menimbulkan perubahan morfologi perakaran.

Hasil penelitian menunjukkan dari 78 sampel tanah dan akar tanaman di beberapa lokasi lahan rawa Kalimantan didapatkan 15 isolasi bakteri *Azospirillum* yang berfungsi sebagai penambat N (Tabel 36). Isolat-isolat bakteri tersebut tumbuh dan membentuk pelikel di bawah permukaan medium NFB semisolid. Pelikel (selaput tipis) yang terbentuk pada medium semisolid

tersebut memberikan kondisi mikroaerofilik sehingga memungkinkan bakteri penambat N melakukan aktivitas (Mukhlis *et al.*, 2010).

*Azotobacter* merupakan bakteri penambat N yang hidup di daerah perakaran. Dijumpai hampir pada semua jenis tanah tetapi populasinya relatif rendah. Pada medium yang sesuai, *Azotobacter* mampu menambat 10 - 20 mg nitrogen/g gula (Allison, 1973). Ada beberapa spesies *Azotobacter* yang telah diketahui sebagai penambat N, antara lain: *A. chroococcum*, *A. beijerinckii*, *A. paspali*, *A. vinelandii*, *A. agilis*, *A. insignis* dan *A. macrocytogenes* (Thompson dan Skerman, 1979). Bakteri ini juga menghasilkan sejenis hormon yang kurang lebih sama dengan hormon pertumbuhan tanaman dan mampu menghambat pertumbuhan jenis fungi yang bersifat patogen.

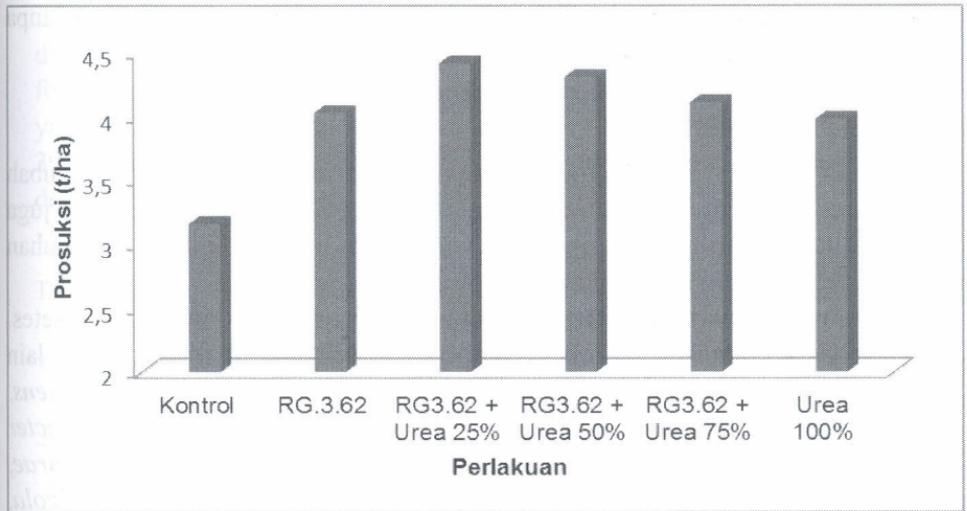
Razie (2003) mengemukakan bahwa *Azotobacter* spp penambat N banyak ditemukan pada lahan pasang surut tipe luapan A (>50%) dibandingkan pada tipe luapan B dan C. Di samping itu paling banyak (31%) ditemukan pada padi lokal Siam Pandak yang banyak ditanam pada tipe luapan A. Efektivitas dalam menambat N<sub>2</sub> oleh strain ini mencapai 2,92 nmol N/nmol C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, lebih tinggi dibandingkan yang dikemukakan Zubeer (1998) berkisar 0,04-0,67 nmol N/nmol C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>. Razie *et al.* (2007) melaporkan bahwa populasi *Azotobacter* di lahan rawa pasang surut <10<sup>5</sup> sel/g tanah.

Menurut Razie dan Haris (2004) *Azotobacter* (isolat RG.3.62) menghasilkan senyawa aktif pengatur tumbuh tanaman sebesar 18,29 ppm IAA (Indole Acetic Acid). Walaupun hasil ini tergolong rendah, tetapi memiliki efektivitas yang tinggi dalam menambah panjang dan luas permukaan akar.

Tabel 36. Isolat-isolat bakteri *Azospirillum* spp dari beberapa lokasi lahan rawa Kalimantan

Kode Isolat	Asal isolat
Bld N1	Belanden (Kalsel)
Bld N2	Belandean (Kalsel)
Bld N3	Belandean (Kalsel)
Brm N1	Barambai (Kalsel)
Brm N2	Barambai (Kalsel)
Brm N4	Barambai (Kalsel)
Trt N2	Terantang (Kalsel)
Tlr N3	Talaran (Kalsel)
Tlr N4	Talaran (Kalsel)
Lmt N1	Lamunti (Kalteng)
Lmt N3	Lamunti (Kalteng)
Klpn N1	Kalampangan (Kalteng)
Klpn N2	Kalampangan (Kalteng)
Blg S N1	Bulungan (Kaltim)
Blg S N2	Bulungan (Kaltim)

Sumber : Mukhlis *et al.*, 2010



Gambar 63. Produksi padi lokal Siam Pandak yang diinokulasi Azotobacter RG 3.62 untuk mensubstitusi urea (Razie *et al.*, 2012)

Tabel 37. Kandungan N, P, dan K pada jaringan padi Siam Pandak yang diinokulasi Azotobacter RG.3.62 dan pemberian urea.

Perlakuan	N Jaringan (%)	P Jaringan (%)	K Jaringan (%)
Kontrol	0,56	0,12	1,08
RG.3.62	0,67	0,14	1,28
RG.3.62+urea 25%	0,59	0,10	1,01
RG.3.62+urea 50%	0,52	0,12	0,86
RG.3.62+urea 75%	0,46	0,15	1,02
Urea 100%	0,59	0,11	1,03

Sumber : Razie *et al.* (2012)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian Azotobacter (RG 3.62) dengan urea 25% menghasilkan padi sebesar 4,42 t/ha lebih tinggi dibandingkan dengan penambahan urea 50% (Gambar 63). Hal ini peningkatan pemberian pupuk urea dapat menurunkan aktivitas penambahan  $N_2$  oleh Azotobacter. Bakteri ini mampu mengurangi takaran pemupukan urea yang dianjurkan hingga 75% (Razie *et al.*, 2012). Hasil pengukuran kandungan N, P, dan K pada jaringan tanaman padi dengan perlakuan Azotobacter dan urea tersebut masing-masing berkisar 0,46-0,67% N, 0,10-0,15% P, dan 0,86-1,28% K (Tabel 37). Kecuali hara K, kandungan hara N dan P masih berada dalam kisaran optimum sesuai dengan yang dikemukakan oleh Dobermann dan Fairhurst (2000). Pada Tabel 37 tersebut juga menunjukkan bahwa jumlah K

yang diserap oleh tanaman padi meningkat dengan hanya *Azotobacter* tanpa pemberian urea (1,28% K).

### **Mikroba pelarut fosfat**

Mikroba pelarut fosfat merupakan mikroba tanah yang mampu merubah fosfat yang terikat menjadi tersedia bagi tanaman. Selain itu, mikroba ini juga menghasilkan vitamin dan fitohormon yang dapat memperbaiki pertumbuhan akar tanaman dan meningkatkan serapan hara.

Mikroba pelarut fosfat terdiri atas bakteri, fungi dan aktinomisetes. Mikroba yang termasuk dalam kelompok bakteri pelarut fosfat antara lain adalah *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus licheniformis*, *B. amyloliquefaciens*, *B. artrophaeus*, *Paenibacillus macerans*, *Vibrio proteolyticus*, *Xanthobacter agilis*, *Enterobacter asburiae*, *Enterobacter aerogenes*, *Enterobacter taylorae*, *Kluyvera cryocrescens*, *Pseudomonas stutzeri*, *Cryseomonas luteola*, *Arthrobacter ureafaciens*, *Phyllobacterium myrsinacearum*, *Rhodococcus erythropolis* dan isolat-isolat yang tergolong genus *Serratia*, *Chryseobacterium*, *Delfia*, *Gordonia* (Fankem *et al.*, 2008; Vazquez *et al.*, 2000).

Proses pelarutan fosfat dilakukan oleh enzim fosfatase dengan cara mineralisasi dan pelarutan. Mineralisasi merupakan pelepasan fosfat dari senyawa P organik dalam tanah. Sedangkan pelarutan merupakan pelepasan fosfat dari kompleks anorganik oleh asam-asam organik. Asam organik yang tergolong hidroksil dan karboksil akan mengkelat kation yang mengikat fosfat menjadi bentuk terlarut (Wales, 2010). Beberapa asam organik yang terlibat pada pelarutan fosfat adalah asam sitrat, asam glukonat, asam laktat, asam suksinat dan asam propionat (Chen *et al.*, 2006). Selanjutnya Vazquez *et al.* (2000) mengemukakan bahwa terdapat hubungan mutualisme antara tanaman dengan bakteri pelarut fosfat yang terkonsentrasi pada rhizosfer. Bakteri menyediakan fosfat terlarut, sedangkan tanaman mensuplai senyawa karbon seperti gula yang digunakan untuk pertumbuhannya. Menurut Goenadi *et al.* (1993), bahwa kemampuan bakteri pelarut fosfat dalam melarutkan fosfat berbeda-beda tergantung jenis strainnya. Oleh karena itu perlu dilakukan seleksi untuk mendapatkan isolat bakteri pelarut fosfat yang unggul sebagai komponen utama biofertilizer.

Hasil pengujian yang dilakukan oleh Lestari *et al.* (2010) menunjukkan bahwa isolat-isolat bakteri pelarut fosfat yang diisolasi dari beberapa lokasi di lahan rawa mempunyai kemampuan dalam melarutkan P pada media Pikovskaya padat berdasarkan rasio Z/K (Tabel 38). Rasio Z/K paling tinggi ditunjukkan oleh isolate TD 4 yaitu 8,0, sedangkan paling kecil oleh isolat APL 4 dan TB yaitu 1,67. Menurut Fankem (2008), bahwa rasio Z/K menunjukkan semakin besar nilai semakin tinggi aktivitas bakteri pelarut fosfat dalam melarutkan P.

Kemampuan bakteri pelarut fosfat dipengaruhi oleh pH medium yang disebabkan oleh asam-asam organik yang dilepaskan oleh bakteri pelarut fosfat dalam aktivitasnya. Asam-asam organik ini akan membentuk kompleks yang stabil dalam bentuk CaP dan AIP sehingga dilepaskan ion  $H_2PO_4^-$ . Tabel 39 memperlihatkan ketersediaan P tanah sulfat masam yang diinokulasi dengan bakteri pelarut fosfat.

Table 38. Kemampuan bakteri pelarut fosfat melarutkan fosfat pada media agar Pikovskaya yang diinkubasi selama 10 hari

Isolates	Asal isolat	Zona jernih (Z) mm	Diameter koloni (K) mm	Rasio Z/K
API 4	Palingkau (Kalsel)	5	3	1,67
BM5	Basarang (Kalteng)	7	4	1,75
BA3	Barambai (Kalsel)	9	4	2,25
TB4	Belandean (Kalsel)	5	3	1,67
TS 4	Tarantang (Kalsel)	7	4	1,75
TD 4	Dadahup (Kalteng)	8	1	8,00
SU 4.1	Barambai (Kalsel)	10	5	2,00
APC 4.1	Pekantua (Riau)	1.2	0.5	2,40

Sumber : Lestari et al. (2010)

Tabel 39. Ketersediaan P tanah sulfat masam yang diinokulasi bakteri pelarut P.

Kode isolat	Pengamatan (minggu)					
	Awal	I	II	III	IV	V
P tersedia pada tanah tidak steril (ppm)						
12	74,35	87,85	92,34	90.43	69.71	98.62
15	74,35	89,23	85.13	76.19	101.08	73.56
19	74,35	90,78	83.06	70.29	92.79	64.32
P tersedia pada tanah steril (ppm)						
12	75,16	66,23	118.12	78.35	75.64	89.55
15	75,16	55.56	70.42	66.18	56.83	64.08
19	75,16	56.16	60.48	81.66	82.51	80.27

Sumber : Mukhlis et al. (2010)

### C. MIKROBA TANAH SEBAGAI BIOREMEDIATOR

Bioremediasi adalah suatu proses pemulihan kesehatan dari pencemaran dengan memanfaatkan mikroba (bakteri, fungi, aktinomisetes). Bagi mikroba tertentu, cemaran atau polutan dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi untuk pertumbuhan mereka (Alexander, 1997).

Pencemaran di lahan rawa umumnya terjadi akibat adanya pirit dan asam-asam organik. Pada musim kemarau, permukaan air tanah turun di bawah permukaan lapisan pirit sehingga pirit teroksidasi yang menghasilkan pencemaran (Al, Fe, H<sub>2</sub>S). Akibat oksidasi pirit terjadi pemasaman tanah dan perairan di lahan rawa. Kemasaman yang tinggi tersebut berdampak negatif terhadap sifat kimia dan aktivitas mikroba tanah (van Breemen, 1993). Menurut Widjaja-Adhi (1997) bahwa dalam proses penurunan pH, kation Ca, Mg dan K terdesak dan tercuci terbawa air pada saat air surut, sehingga tanah menjadi sangat masam dan miskin hara.

Proses oksidasi pirit diawali dengan reaksi antara oksigen terlarut dalam air tanah yang bereaksi lambat dengan pirit yang menghasilkan Fe<sup>2+</sup> dan SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> atau S elemen, dengan katalisator bakteri *Thiobacillus thiooxidans* (Atlas dan Bertha, 1993; Alloway dan Ayres, 1997). Menurut van Breemen (1993), kecepatan penurunan pH akibat oksidasi pirit ditentukan oleh jumlah pirit, kecepatan oksidasi, percepatan perubahan hasil oksidasi dan kapasitas netralisasi.

Pada musim hujan, areal lahan sulfat masam akan tergenang kembali sehingga terbentuk suasana reduktif. Bakteri yang mampu menggunakan sulfat sebagai reseptor elektron dalam respirasi dikenal sebagai bakteri pereduksi sulfat (BPS) yang merupakan heterotrof sejati. BPS yang tersebar secara luas di alam meliputi genus *Desulfovibrio* dan *Desulfotomaculum* (Moodie dan Ingledew, 1990). Reaksi reduksi sulfat dengan bantuan BPS menyebabkan peningkatan pH karena adanya penambahan ion OH<sup>-</sup> dan penggunaan ion H<sup>+</sup> dalam reaksi reduksi (Dent, 1998; Atlas dan Bertha, 1993). Pada lahan sulfat masam yang digenangi kembali, kecepatan reduksi oleh BPS berjalan lambat karena bakteri anaerob kurang mampu berkembang pada lahan sulfat masam yang kandungan bahan organiknya rendah. Oleh karena itu, pemanfaatan teknologi mikroba diharapkan dapat meningkatkan fungsi mikroba *indigenous* (asli alamiah) di dalam tanah.

Hasil isolasi BPS memperlihatkan bahwa masing-masing sampel tanah dan air mengandung populasi BPS yang berbeda (Tabel 40). Dari 55 sampel yang diisolasi, terdapat 45 yang memperlihatkan adanya BPS (Mukhlis, 2013). Warna hitam pada medium disebabkan lepasnya H<sub>2</sub>S yang bereaksi dengan ion Fe<sup>2+</sup> membentuk FeS yang berwarna hitam (Atlas dan Bertha, 1993). Gambar 64 memperlihatkan pertumbuhan berbagai isolat BPS pada media *Postgate B*. Media yang berubah menjadi warna hitam menunjukkan adanya konsorsium

BPS dan terjadi proses reduksi dari sulfat menjadi sulfida. Semakin hitam dan pekat pada media, semakin tinggi populasi BPS.

Tabel 40. Hasil isolasi BPS pada berbagai sampel tanah sulfat masam dan air.

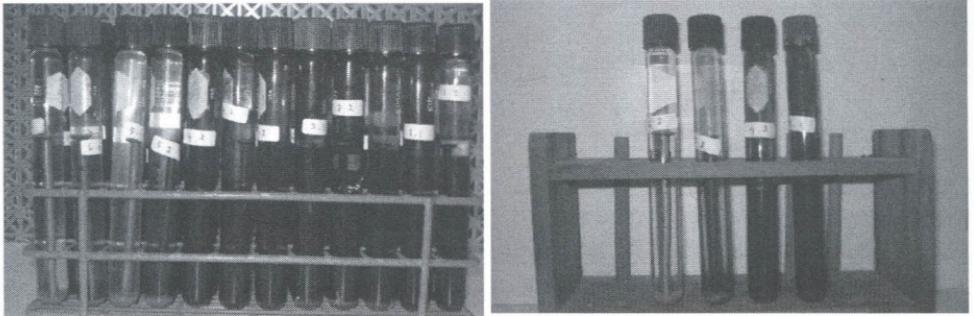
Lokasi sampel	Tanah (kedalaman) atau air	Kemampuan tumbuh BPS
SMA - Mulia Sari, Sumsel	0 - 30	++
SMA - Mulia Sari, Sumsel	30 - 50	+++
SMA - Mulia Sari, Sumsel	50 - 70	+++
SMP - Mulia Sari, Sumsel	0 - 30	++
SMP - Mulia Sari, Sumsel	30 - 50	+
SMP - Mulia Sari, Sumsel	50 - 70	+
SMA - Telang Sari, Sumsel	0 - 30	+++
SMA - Telang Sari, Sumsel	30 - 50	+++
SMA - Telang Sari, Sumsel	50 - 70	+++
Gambut (K.sawit) - Mamuju, Sulbar	0 - 30	+
Gambut (K.sawit) - Mamuju, Sulbar	30 - 50	++
Gambut (K.sawit) - Mamuju, Sulbar	50 - 70	++
Gambut (Padi 1) - Mamuju, Sulbar	0 - 30	++
Gambut (Padi 1) - Mamuju, Sulbar	30 - 50	+++
Gambut (Padi 1) - Mamuju, Sulbar	50 - 70	+++
Gambut (Padi 2) - Mamuju, Sulbar	0 - 30	++
Gambut (Padi 2) - Mamuju, Sulbar	30 - 50	+++
Gambut (Padi 2) - Mamuju, Sulbar	50 - 70	+++
SMA - Barambai 1, Kalsel	0 - 30	+++
SMA - Barambai 1, Kalsel	30 - 50	+++
SMA - Barambai 1, Kalsel	50 - 70	-
SMA - Barambai 2, Kalsel	0 - 30	+++
SMA - Barambai 2, Kalsel	30 - 50	++
SMA - Barambai 2, Kalsel	50 - 70	-
SMA - Barambai 3, Kalsel	0 - 30	+
SMA - Barambai 3, Kalsel	30 - 50	+++
SMA - Barambai 3, Kalsel	50 - 70	-
SMP - Belandean, Kalsel	0 - 30	++
SMP - Belandean, Kalsel	30 - 50	++
SMP - Belandean, Kalsel	50 - 70	+
SMP - Mintin, Kalteng	0 - 30	+++
SMP - Mintin, Kalteng	30 - 50	++
SMP - Mintin, Kalteng	50 - 70	+
SMP - Basarang, Kalteng	0 - 30	++
SMP - Basarang, Kalteng	30 - 50	+
SMP - Basarang, Kalteng	50 - 70	+++
SMP - Palingkau, Kalteng	0 - 30	+++
SMP - Palingkau, Kalteng	30 - 50	+
SMP - Palingkau, Kalteng	50 - 70	+

Tambang Adaro 1– Tanjung, Kalsel	0 – 30	-
Tambang Adaro 1– Tanjung, Kalsel	30 - 50	+
Tambang Adaro 2– Tanjung, Kalsel	0 – 30	++
Tambang Adaro 2– Tanjung, Kalsel	30 - 50	++
Tambang Adaro 3– Tanjung, Kalsel	0 – 30	-
Tambang Adaro 3– Tanjung, Kalsel	30 - 50	-
SMA - Mulia Sari, Sumsel	air	+++
SMP - Mulia Sari, Sumsel	air	+++
SMA – Telang Sari, Sumsel	air	++
SMA – Barambai 2, Kalsel	air	-
SMA – Barambai 3, Kalsel	air	+
SMP – Belandean, Kalsel	air	++
SMP – Basarang, Kalteng	air	-
SMP – Mintin, Kalteng	air	+++
SMP – Palingkau, Kalteng	air	++
Tambang Adaro 1– Tanjung, Kalsel	air	+++
Tambang Adaro 2– Tanjung, Kalsel	air	-
Tambang Adaro 3– Tanjung, Kalsel	air	-

Ket. : SMA = sulfat masam aktual ; SMP = sulfat masam potensial ;

+ = sedikit ; ++ = sedang ; +++ = tinggi ; - = tidak ada

Sumber: Mukhlis (2013)



Gambar 64. Pertumbuhan berbagai isolat BPS pada media *Postgate B*. (Dok. Mukhlis/Balittra)

Dari enam isolat BPS terpilih diketahui masing-masing mempunyai kemampuan yang berbeda dalam meningkatkan pH dari media sangat masam (pH 3,5) menjadi hampir netral (pH 6,19–6,78). Hasil pengukuran kadar sulfat dan pH medium pada akhir masa inkubasi (14 hari) pada perlakuan berbagai tingkat pH medium awal disajikan pada Tabel 41 dan 42. Menurut Alexander (1997) bahwa aktivitas BPS dipengaruhi oleh kisaran pH yang sempit dan tidak ada pertumbuhan pada pH <5,5. Walaupun demikian, pada penelitian ini BPS berhasil dibiakkan pada pH 3,5. Hasil pengamatan juga menunjukkan bahwa isolat BPS yang ditumbuhkan pada medium pH rendah memerlukan

waktu lebih lama (10–15 hari setelah inokulasi), sedangkan pada pH yang mendekati netral (6) terlihat pertumbuhan BPS hanya dalam waktu 4-5 hari setelah inokulasi. Saida (2001) menunjukkan bahwa BPS ekosistem air hitam gambut memperlihatkan efektivitasnya pada media tumbuh Postgate B mulai dari umur 4–27 hari setelah inokulasi. BPS dapat menggunakan sulfat sebagai akseptor elektron dalam aktivitas metabolismenya (Higgin *et al.*, 2003). Sulfat direduksi menjadi sulfida sehingga konsentrasinya dalam medium mengalami penurunan. Penurunan kadar sulfat ini berdampak pada peningkatan pH, akibat tingginya kadar H<sub>2</sub>S yang terbentuk.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa inokulasi BPS mampu meningkatkan pH tanah, jumlah anakan, dan hasil padi, serta menurunkan kadar sulfat tanah (Tabel 43 dan 44). Kemampuan BPS dalam meningkatkan pH tanah tidak dipengaruhi oleh populasi, tetapi ditentukan oleh asal inokulan. Hasil penelitian Gofar (2003) menunjukkan bahwa peningkatan dosis inokulan BPS dari 0,5–2,0 ml per lubang tanam tidak diikuti oleh peningkatan pH tanah.

Tabel 41. Pengaruh isolat BPS terhadap pH pada berbagai tingkat pH media.

Kode Isolat BPS	Perubahan pH pada berbagai tingkat pH media					
	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
8.1	6,78	7,03	7,55	7,85	7,78	7,90
15.1	6,19	6,92	7,28	8,81	8,55	7,73
38.1	6,75	6,90	7,09	7,76	7,96	7,85
42	6,69	6,76	7,65	8,06	7,91	7,41
52	6,78	7,02	7,89	7,53	7,73	8,01
53	6,71	6,83	7,33	7,51	7,74	7,78
Kontrol	3,57	4,13	4,66	5,14	5,58	6,13

Inokulasi BPS memperlihatkan penurunan sulfat dan peningkatan pH yang nyata dibanding tanpa inokulasi, meskipun kedua perlakuan dalam suasana anaerob. Pada penelitian ini, inokulasi BPS mampu meningkatkan pH dari 3,90 (pH awal) menjadi 5,42 atau 38,97 %. Dibandingkan tanpa inokulasi, hanya terjadi peningkatan pH dari 3,90 menjadi 4,63 atau 18,72%. Penurunan kadar sulfat tanah dari 319,44 menjadi 235,10 ppm atau 26,40% (Gambar 65). Inokulasi BPS memperlihatkan hasil padi yang lebih tinggi (23,33 g/rmp) dibanding tanpa inokulasi (17,60 g/rmp) atau peningkatan sebesar 32,56%. Hasil penelitian Gofar (2003) menunjukkan bahwa inokulasi BPS pada tanah sawah di lahan rawa pasang surut dapat meningkatkan pH tanah dan menurunkan kandungan ion sulfat serta meningkatkan secara nyata hasil padi.

Tabel 42. Pengaruh 6 isolat BPS terhadap sulfat pada berbagai tingkat pH media

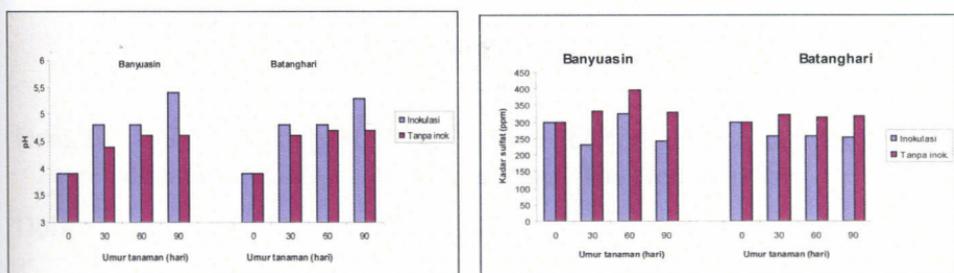
Kode Isolat BPS	Perubahan sulfat (me/l) pada berbagai tingkat pH media					
	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
8.1	3,21	4,11	3,79	4,61	3,02	3,39
15.1	5,67	4,77	5,72	5,89	6,48	2,26
38.1	7,87	8,46	6,65	4,58	4,71	2,84
42	5,22	4,89	6,19	4,77	4,81	0,04
52	5,99	4,98	6,99	1,85	2,16	0,83
53	8,26	8,07	8,85	6,42	7,66	5,00
Kontrol	6,20	6,76	7,42	7,53	7,15	7,24

Tabel 43. Pengaruh jenis isolat dan dosis inokulan terhadap pH, kadar sulfat, dan pertumbuhan padi (fase vegetatif).

Perlakuan	pH tanah	Kadar sulfat tanah (ppm)	Tinggi tanaman (cm)	Jumlah anakan
Jenis isolat :				
8.1	4,79	266,35	68,24	6,04
42	4,78	293,69	67,73	6,48
52	4,74	293,21	67,82	6,71
Dosis BPS (ml/pot) :				
0	4,50	425,99	63,38	5,24
2	4,88	238,90	69,06	6,97
4	4,80	235,27	70,36	7,17
6	4,88	238,29	68,43	6,82

Tabel 44. Pengaruh jenis isolat dan dosis inokulan terhadap pH, kadar sulfat, pertumbuhan padi (fase generatif) dan hasil.

Perlakuan	pH tanah	Kadar sulfat tanah (ppm)	Tinggi tanaman (cm)	Jumlah anakan	Hasil (g/rmp)
Jenis isolat :					
8.1	5,21	275,94	104,38	8,82	23,33
42	5,29	268,20	102,23	8,48	21,96
52	5,33	262,84	103,17	9,32	22,09
Dosis BPS (ml/pot) :					
0	4,63	319,44	100,65	7,30	17,60
2	5,42	235,10	104,89	8,95	22,38
4	5,40	242,29	101,80	8,57	21,41
6	5,39	244,71	103,07	8,72	21,79



Gambar 65. Pengaruh inokulasi BPS terhadap pH dan kadar sulfat tanah selama pertumbuhan padi.

## D. KESIMPULAN DAN SARAN

1. Penggunaan mikroba perombak bahan organik, penambat N, dan pelarut P sebagai biofertilizer diharapkan dapat mendukung program kelestarian lahan dan penyelamatan ekosistem. Pemahaman proses dan strategi pemanfaatan biofertilizer untuk memperbaiki kualitas tanah, dan memelihara keanekaragaman hayati akan menunjang keberlanjutan produktivitas lahan pertanian.
2. Hasil identifikasi 71 isolat *Trichoderma* dari berbagai lokasi lahan sulfat masam Kalimantan diketahui spesies yang dominan adalah *T. harzianum* (61,97%), diikuti oleh *T. viride* (22,59%) dan *koningii* (15,49%). Isolat-isolat tersebut mempunyai kemampuan tinggi dalam merombak bahan organik.

3. Hasil isolasi bakteri dari beberapa lokasi lahan rawa Kalimantan dan Sumatera diketahui bahwa bakteri *Azospirillum* spp dan *Azotobacter* spp dapat berfungsi sebagai penambat N dan *Bacillus* spp. dapat berfungsi sebagai pelarut P yang adaptif pada kondisi tanah masam di lahan rawa.
4. Pemanfaatan bakteri pereduksi sulfat (*Desulfovibrio* spp) sebagai bioremediator lahan rawa dapat meningkatkan pH tanah dan pertumbuhan tanaman serta menurunkan kadar sulfat tanah.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alexander, M. 1997. Introduction to Soil Microbiology. 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons, New York.
- Allison, F.E. 1973. Soil Organic Matter and It's Role in Crop Production. Elsevier Scientific Publishing Company. New York. p. 174–191.
- Alloway B.J. and Ayres D.C. 1997. Chemical Principles of Environmental Pollution. Second edition. London: Blackie Acad. & Professional.
- Atlas, R. and R. Bertha. 1993. Microbial Ecology: Fundamentals and Applications. 3<sup>rd</sup> ed. The Benjamin Cumming Publ. Co. Inc.
- Chen, Y.P., P.D. Rekha, A.B. Arun, F.T. Shen, W.A. Lai, C.C. Young. 2006. Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities. Appl. Soil Ecol. 34:33–41.
- Darwis A. A., I. Sailah, T.T. Irawadi, dan Safriani. 1997. Kajian kondisi fermentasi pada produksi selulase dari limbah kelapa sawit (tandan kosong dan sabut) oleh *Neurospora sitophila*. J. Teknol. Ind. Pert. 5(3): 199–207.
- Dent, D. 1986. Acid sulphate soils. A base line for research and development. Publication No. 39, ILRI. Wageningen. The Netherlands.
- Dobermann, A. and T. Fairhurst. 2000. Rice: Nutrient Disorders & Nutrient Management. IRRI.
- Fankem, H., L. Ngo Kot, A. Deubel, J. Quinn, W. Merbach, F. X. Etoa, D. Nwaga. 2008. Solubilization of inorganic phosphates and plant growth promotion by strains of *Pseudomonas fluorescens* isolated from acidic soils of Cameroon. African Journal of Microbiology Research. 2:171-178.
- Goenadi, H. G., R. Saraswati dan Y. Lestari. 1993. Kemampuan melarutkan fosfat dari beberapa isolat bakteri asal tanah dan pupuk kandang sapi. Menara Perkebunan. 61(2):44-49.
- Gofar, N. 2003. Potensi bakteri pereduksi sulfat asal tanah rawa pasang surut Sumatera Selatan dalam mereduksi sulfat dan meningkatkan pH tanah, serta pengaruhnya terhadap tanaman padi sawah. Makalah Pertemuan Ilmiah Tahunan 2003, 28-29 Agustus 2003 di Bandung. Perhimpunan Mikrobiologi Indonesia.

- Gunalan. 1996. Penggunaan mikroba bermanfaat pada bioteknologi tanah berwawasan lingkungan. *Majalah Sriwijaya* vol. 32 No. 2. Universitas Sriwijaya.
- Hanafiah, K.A., I. Anas, A. Napoleon, dan N. Ghofar. 2005. *Biologi Tanah Ekologi & Makrobiologi Tanah*. PT. Raja Grafindo Persada. Jakarta. 166 hal.
- Higgin, J. P., B.C. Hards and A.L. Mattes. 2003. Bioremediation of acid rock drainage using sulphate reducing bacteria. [www.Jacqueswhitford.com/sitejw/media/14SCsudburrypapers2003mayhiggins10\\_8\\_pdf](http://www.Jacqueswhitford.com/sitejw/media/14SCsudburrypapers2003mayhiggins10_8_pdf) (3 Agustus 2004)
- Ilmen, MA, Saloheimo, Maija-Leena O, ME Penttila. 1997. Regulation of cellulase gene expression in the filamentous fungus *Trichoderma reesei*. *Appl Environ Microbiol* 63(4): 1208-1306.
- James, E., and F.L. Olivares. 1997. Infection and colonization of sugarcane and other graminaceous plants by endophytic diazotrophs. *Plant Science* 17:77-119.
- Kennedy, A.C. and R.I. Papendick. 1995. Microbial characteristics of soil quality. *J. Soil Water Conservation* 50: 243-248.
- Khalid, A, M. Arshad and Z.A. Zahir. 2004. Screening plant growth-promoting rhizobacteria for improving growth and yield of wheat. *Journal of Applied Microbiology*, 96: 473-480.
- Kurnia, U., D. Setyorini, T. Prihatini, S. Rochayati, Sutono dan H. Suganda. 2001. Perkembangan dan Penggunaan Pupuk Organik di Indonesia. Rapat Koordinasi Penerapan Penggunaan Pupuk Berimbang dan Peningkatan Penggunaan Pupuk Organik. Direktorat Pupuk dan Pestisida, Direktorat Jendral Bina Sarana Pertanian, Jakarta, Nopember 2001.
- Lestari, Y., Mukhlis, dan S. Nurzakiah. 2010. Pelarutan trikalsium fosfat dan aluminium fosfat oleh bakteri pelarut fosfat yang diisolasi dari rhizosfer padi. Hal. 37-43. *Dalam Mukhlis et al.* (eds) *Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Mikrobiologi Bidang Pangan, Kesehatan dan Lingkungan*. Banjarbaru, 27 September 2010. Perhimpunan Mikrobiologi Indonesia Cabang Kalsel dan Fak. Kedokteran Univ. Lambung Mangkurat. Banjarbaru.

- Moodie, A.D. and W.J. Ingledeu. 1991. Microbial anaerobic respiration. *In* A.H. Rose and D.W. Tempest (eds) *Advance in Micronial Physiology*. Vol. 31. Academic Press, Ltd.
- Mukhlis, Y. Lestari, A. Budiman, dan S. Nurzakiah. 2010. Penelitian dan Pengembangan Teknologi Pupuk Mikroba "Biotara" untuk Meningkatkan Efisiensi Pemupukan >30% dan Produksi Padi >20% di Lahan Sulfat Masam. Laporan Hasil Penelitian. Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa. Banjarbaru.
- Mukhlis. 2013. Pemanfaatan bakteri pereduksi sulfat (*Desulfovibrio* sp.) untuk meningkatkan produktivitas lahan rawa sulfat masam. Hal. 1405-1414. *Dalam* Cahyani, V.R. *et al.* (eds) *Prosiding Seminar dan Kongres Nasional X Himpunan Ilm Tanah Indonesia (HITI): Tanah untuk Kehidupan yang Berkualitas*. Surakarta, 6-8 Desember 2011. Buku 3. Jurusan Ilmu Tanah Fakultas Pertanian UNS. Surakarta.
- Nur, H.S. 2010. Karakterisasi selulase ekstraseluler isolate bakteri asal tanah pertanian pasang surut. Hal. 165-177. *Dalam* Mukhlis *et al* (eds) *Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Mikrobiologi Bidang Pangan, Kesehatan dan Lingkungan*. Banjarbaru, 27 September 2010. Perhimpunan Mikrobiologi Indonesia Cabang Kalsel dan Fak. Kedokteran Univ. Lambung Mangkurat. Banjarbaru.
- Prihatini, T., A. Kentjanasari, dan Subowo. 1996. Pemanfaatan biofertilizer untuk peningkatan produktivitas lahan pertanian. *Jurnal Litbang Pertanian XV*(1).
- Razie, F. 2003. Karakteristik *Azotobacter* spp. dan *Azospirillum* spp. dari Rizosfer Padi Sawah di Daerah Dataran Banjir Kalimantan Selatan dan Pengaruhnya terhadap Pertumbuhan Awal Tanaman Padi. Tesis. Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Razie, F dan A. Haris. 2004. Karakteristik Lingkungan Mikroba Panambat N2 (*Azotobacter* spp.) pada Persawahan Daerah Dataran Banjir Kalimantan Selatan dan Kemampuannya Mendukung Pertumbuhan Padi. Laporan Penelitian Research Grant. Univ. Lambung Mangkurat. Banjarbaru.
- Razie, F. H. Ifansyah dan Jumar. 2007. Peranan *Azotobacter* pada Tanah Sawah Alami terhadap Produksi Padi Spesifiknya di Kalimantan Selatan. Laporan Hibah Penelitian XIV. Universitas Lambung Mangkurat. Banjarbaru.

- Razie, F., H. Ifansyah dan Jumar. 2012. Potensi *Azotobacter* RG3.62 dalam Mengurangi Pupuk N untuk Meningkatkan Produksi Padi Lokal Siam Pandak di Persawahan Pasang Surut Tipologi A Kalimantan Selatan. Hal 79-88. *Dalam* Rejekiingrum P. *et al.* (eds) Prosiding Seminar Nasional Sumberdaya Lahan Pertanian, 13-14 Juli 2011. Buku III. Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian. Bogor.
- Saida. 2001. Karakterisasi dan Uji Aktivitas Isolat Bakteri Pereduksi Sulfat Asal Ekosistem Air Hitam Kalimantan tengah. Tesis (tidak dipublikasikan). Program Pasca Sarjana. IPB. Bogor.
- Saraswati, R. 2007. Peran pupuk hayati dalam meningkatkan efisiensi pemupukan menunjang keberlanjutan produktivitas tanah. *J. Sumberdaya Lahan* 1(4):51-56.
- Setyorini, D., R. Saraswati, dan E.K. Anwar. 2012. Kompos. *Dalam* R.D.M. Simanungkalit, D.A. Suriadikarta, R. Saraswati, D. Setyorini, dan W. Hartatik. Pupuk Organik dan Pupuk Hayati. Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian. Bogor. Hal 11-40.
- Sutanto, R. 2002. Penerapan Pertanian Organik. Kanisius. Yogyakarta.
- Takasima S, A Nakamura, H Masaki, T Uozomi. 1996. Purification and Characterization of Cellulases from *Humicola grisea*. *Bio. Sci. Biotech. Biochem.* 60(1): 77-82.
- Thompson, J.P. and V.B.D. Skerman. 1979. Azotobacteriaceae: The Taxonomy and Ecology of the Aerobic Nitrogen Fixing Bacteria. Academic Press. New York.
- Trolldenier, G. 1977. Influence of some environmental factors on nitrogen fixation in the rhizosphere of rice. *Plant and Soil* 47: 203-302.
- Van Breemen, N. 1993. Environmental aspects of acid sulphate soils. *In* Dent D.K. and M.E.F. van Mensvoort (eds) Selected paper of the Ho Chi Minh City Symposium on Acid Sulphate Soil, Vietnam, March 1992. p. 391-402.
- Vazquez, P., G. Holguin, M. E. Puente, A. Lopez-cortes and Y. Bashan. 2000. Phosphate-solubilizing microorganisms associated with the rhizosphere of mangroves in a semiarid coastal lagoon. *Biol. Fertil. Soils.* 30:460-468.
- Wales, J., 2010. Phosphate Solubilizing Bacteria. [http://en.wikipedia.org/wiki/Phosphate\\_solubilizing\\_bacteria](http://en.wikipedia.org/wiki/Phosphate_solubilizing_bacteria). Diakses 26 November 2010.

- Waksman, S. A. 1952. *Soil Microbiology*. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Widjaja-Adhi, IPG. 1997. Mencegah degradasi dan merehabilitasi lahan sulfat masam. Makalah disampaikan pada Pertemuan Pengelolaan Lahan Pasang Surut Kalimantan Selatan. Tanggal 18 Maret 1997 di Banjarmasin.
- Zubeer, D.A. 1998. Biological Dinitrogen Fixation: Introduction and Nonsymbiotic. *In* Sylva, D.M., J.J. Fuhrmann, P.G. Hartel and D.A. Zubeer (eds) *Principles and Applications of Soil Microbiology*. Prentice Hall, Inc. p. 295-321