

Teknik Pengelolaan Lahan Sulfat Masam di Kalimantan Barat untuk Mendukung Ketahanan Pangan Nasional

Management Techniques for Acid Sulfate Land in West Kalimantan to Support National Food Security

Alifiya Herwitarahman ^a, Pustika Adwiyani ^{a,1,*}

^a Program Studi Agroteknologi, Universitas Tanjungpura, Pontianak, Kalimantan Barat

¹ pustikaadwiyani@faperta.untan.ac.id*

* corresponding author

INFO ARTIKEL

ABSTRACT / ABSTRAK

Sejarah Artikel

Diterima:

16 Mei 2025

Direvisi:

15 Juni 2025

Terbit:

1 Juli 2025

Ketahanan pangan nasional menjadi salah satu cita pemerintah demi mewujudkan pasokan pangan yang stabil dan tidak bergantung dengan produk impor. Pengembangan pertanian di lahan sub optimal menjadi sasaran untuk meningkatkan produktivitas pangan, salah satunya dengan pemanfaatan lahan sulfat masam. Lahan sulfat masam di Kalimantan Barat memiliki harapan untuk dikembangkan, namun perlu penanganan yang tepat agar lahan yang ada dapat digunakan secara optimal. Tujuan dari pembuatan makalah ini yaitu untuk mengidentifikasi dan menghimpun teknik-teknik yang sesuai untuk pengelolaan lahan sulfat masam di Kalimantan Barat dalam mewujudkan ketahanan pangan nasional. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan studi literatur dengan tetap merujuk pada pustaka-pustaka yang telah ditelaah. Hasil yang diperoleh dalam pengelolaan lahan sulfat masam agar dapat dimanfaatkan meliputi perbaikan kesuburan tanah dengan *ameliorant* dan bahan organik, teknologi budidaya jenuh air, pengelolaan air, dan penggunaan varietas yang adaptif dan unggul.

National food security is a key objective for the government in ensuring a stable food supply that is not reliant on imported goods. The development of agriculture on suboptimal lands is a strategic focus to increase food production, with the utilization of acid sulfate soils being one potential approach. Acid sulfate soils in West Kalimantan present promising opportunities for development; however, proper management is crucial to ensure their optimal use. This study aims to identify suitable techniques for managing acid sulfate soils in West Kalimantan to contribute to national food security. The research was conducted through a literature review, referencing existing scholarly works. The findings highlight that effective management of acid sulfate soils involves improving soil fertility through ameliorants and organic materials, applying waterlogged cultivation practices, managing water resources, and utilizing adaptive, high-yielding crop varieties.

This is an open access article under the CC-BY license.



Kata Kunci: amelioran, bahan organik, biochar, budidaya jenuh air, irigasi

Keywords: *ameliorant, organic matter, biochar, saturated water cultivation, irrigation*

1. Pendahuluan

Ketahanan pangan merupakan salah satu hal urgensi yang menjadi fokus dalam mendukung ketersediaan pangan. Semakin meningkatnya jumlah penduduk berdampak pada meningkatnya konsumsi pangan. Konsep ketahanan pangan tidak hanya meningkatkan kuantitas dan kualitas produksi pangan, namun juga terfokus pada perbaikan pasokan pangan dan menjaga kestabilan pangan (Widada *et al.*, 2017). Konsep ketahanan pangan juga menjadi agenda utama pembangunan nasional pemerintah Republik Indonesia dalam mewujudkan kemandirian pangan dan meminimalisir ketergantungan terhadap impor. Upaya peningkatan produktivitas pangan dalam negeri dilakukan dengan peningkatan kualitas, penerapan budidaya pertanian yang baik, dan diversifikasi budidaya yang menjadi aspek penting yang diusahakan untuk menjaga kestabilan pangan dalam negeri.

Peningkatan produktivitas pangan untuk mendukung kestabilan pangan saat ini dilakukan dengan memanfaatkan potensi lahan-lahan marginal atau kurang subur. Lahan sulfat masam menjadi salah satu target pengembangan lahan yang potensial dalam mendukung kestabilan dan keberlanjutan pangan.

Lahan sulfat masam Indonesia merupakan salah satu lahan sulfat masam terluas yaitu sekitar 8,7 juta ha, yang terdiri atas lahan sulfat masam lahan kering dan rawa. Lahan sulfat masam di Indonesia sebagian diantaranya tertutupi oleh endapan lumpur sungai dan gambut tipis. Kalimantan memiliki sekitar 3,45 juta hektar lahan sulfat masam yang tersebar di sekitar daerah pesisir (Ritung *et al.*, 2015). Di Provinsi Kalimantan Barat banyak dijumpai lahan marginal sulfat masam yang tersebar di muara Sungai Kapuas (12 km) dan Sungai Bengkayang, yang melewati Kota Pontianak, Kabupaten Kubu Raya, Sambas, Singkawang, Bengkayang dan Ketapang bagian Selatan (Sulaeman *et al.*, 2024). Lahan sulfat masam memiliki potensi yang besar untuk upaya diversifikasi budidaya dalam pengembangan pertanian untuk memperbaiki kestabilan pasokan pangan dan sebagai upaya peningkatan produksi tanaman (Zay & Triatmodjo, 2023).

Pengembangan pertanian di lahan sulfat masam salah satunya adalah dengan melaksanakan kegiatan reklamasi lahan sulfat masam pada lahan-lahan sulfat masam aktual maupun potensial. Kegiatan reklamasi lahan ini terdiri dari pembukaan lahan, pengaturan lahan, dan manajemen air. Kegiatan reklamasi ini dapat menurunkan kandungan pirit teroksidasi pada kedalaman 80-140 cm, namun jika gagal justru akan menyebabkan peningkatan oksidasi pirit akibat teroksidasinya endapan pirit sehingga pH akan turun dan melarutkan senyawa logam beracun (Fahmi & Susilawati, 2018). Tantangan pengembangan di lahan sulfat masam meliputi tingginya kemasaman tanah (pH yang rendah), tingginya kelarutan unsur Mn, Al, Fe, terjadinya oksidasi pirit, penurunan kadar basa-basa tertukar, dan rendahnya ketersediaan unsur hara. Masalah-masalah ini jika tidak tertangani dapat menyebabkan stres atau keracunan pada tanaman (Varghese *et al.*, 2024).

Kalimantan Barat sebagai salah satu Provinsi dengan sebaran lahan sulfat masam yang cukup besar, perlu melaksanakan optimalisasi penggunaan lahan sulfat masam guna meningkatkan produktivitas lahan. Sebagian besar lahan tipe rawa pasang surut di Kalimantan Barat sudah difungsikan sebagai areal penanaman padi namun belum optimum karena adanya hambatan dalam pengelolaan lahan (Sudrajat & Gafur, 2020). Pengelolaan lahan sulfat masam yang ideal untuk menjadi lahan pertanian produktif memerlukan beberapa teknik untuk menghindari teroksidasinya pirit pada lahan. Kegiatan-kegiatan yang mungkin dilakukan dalam pengelolaan sulfat masam menurut Fahmi & Susilawati (2018) adalah dengan melaksanakan penghindaran: menghindari ekspos lahan sulfat masam dengan tetap membiarkan lahan tergenang, meminimalkan gangguan pada tanah dengan menggunakan budidaya minimum *tillage*, melakukan manajemen pengairan dengan pengaturan *drainase*, meningkatkan pH dengan menggunakan *ameliorant* seperti kapur, penambahan bahan organik pada tanah untuk mencegah reaksi asam pada tanah, dan penggunaan varietas-varietas toleran pH rendah. Oleh karena itu, beragam penelitian dihimpun untuk mencoba memberikan alternatif solusi dalam mengupayakan lahan sulfat masam agar dapat digunakan secara optimal.

Tujuan penulisan ini adalah menghimpun teknik-teknik budidaya pada lahan sulfat masam yang kemudian dapat diterapkan di Kalimantan Barat. Memberikan rekomendasi pada pengelolaan lahan sulfat masam di Kalimantan Barat agar lebih produktif.

2. Metodologi

Penelitian ini dilakukan menggunakan metode tinjauan sistematis untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis bukti empiris dari studi-studi pustaka mengenai teknik pengelolaan lahan sulfat masam untuk mendukung ketahanan pangan nasional. Pendekatan kualitatif juga diterapkan untuk memastikan interpretasi data yang komprehensif dan representatif terhadap dinamika permasalahan yang diteliti (Annisa *et al.*, 2021).

Penyusunan makalah ini mengikuti kerangka kerja tinjauan kualitatif yang dikembangkan oleh Francis-Baldesari (2006), yang terdiri atas lima tahapan utama: (1) merumuskan pertanyaan utama tinjauan, (2) melakukan pencarian literatur secara sistematis, (3) menyeleksi dan menyaring artikel penelitian yang relevan, (4) melakukan analisis serta sintesis data secara kualitatif, dan (5) menyusun laporan kajian berdasarkan hasil yang diperoleh.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Lahan Sulfat Masam

Tanah sulfat masam umumnya ditemukan di daerah rawa atau lahan pasang surut, dan memiliki sifat fisik serta kimia yang berubah-ubah mengikuti dinamika muka air tanah dan *redoks* (Masganti *et al.*, 2020). Lahan sulfat masam memiliki ciri khas berupa keberadaan pirit di area yang tergenang air. Ketika pirit teroksidasi, ia akan membentuk *jarosite* dan melepaskan asam, sehingga menurunkan pH tanah hingga di bawah 3,5. Proses ini juga menyebabkan silika larut dan melepaskan Al/Fe ke dalam tanah. Kadar Ca dan Mg yang rendah tidak mampu mendukung pertumbuhan tanaman, sementara unsur P menjadi tidak tersedia karena terikat oleh Al/Fe (Michael *et al.*, 2016).

Ciri visual tanah sulfat masam adalah warnanya yang kemerahan atau kekuningan akibat oksidasi besi dan pelapukan asam sulfat dari mineral sulfidik. Teksturnya bervariasi dari berpasir hingga liat. Kandungan bahan organik pada tanah ini umumnya rendah karena tingginya keasaman menghambat proses dekomposisi. Selain itu, drainasenya buruk, menyebabkan genangan air yang memperparah keasaman dan toksisitas logam dalam tanah.

Menurut Masulili (2015) tanah sulfat masam terbagi menjadi tiga kategori:

1. Sulfat masam potensial – mengandung mineral sulfida yang dapat menghasilkan asam sulfat jika tanah terganggu atau drainase buruk.
2. Sulfat masam aktual – tanah dengan sulfat teroksidasi yang memiliki pH sangat rendah dan merusak vegetasi.
3. Lanskap sulfat masam – wilayah luas yang mencakup bentang alam, jenis tanah, dan sistem hidrologi yang terpengaruh oleh keberadaan lahan sulfat masam.

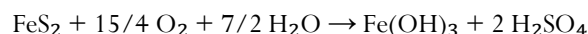
Lahan sulfat masam di Kalimantan Barat tercipta dari batuan sedimen masam yang berumur tua yang didukung oleh curah hujan tinggi sepanjang tahun. Batuan ini terdiri dari batu liat, batu lanau, dan batu pasir. Karakteristik sifat kimia tanahnya adalah masam dan sangat masam. Kandungan bahan organik rendah-sedang, dan semakin bawah kondisi bahan organik berkurang. Kejenuhan basa rendah, tetapi kejenuhan aluminium tinggi. Memiliki horizon argilik dan kandik yang berpengaruh pada permeabilitas tanah. Ordo tanah termasuk pada *Ultisol*, *Oxisol*, dan *Inceptisol* dengan kandungan pH rendah, kesuburan tanah rendah, dan kejenuhan aluminium tinggi (Suharta, 2007).

Pengelolaan lahan sulfat masam memerlukan pendekatan holistik karena sifat tanah yang ekstrem dan sangat reaktif terhadap perubahan lingkungan. Lahan sulfat masam adalah jenis tanah yang mengandung senyawa sulfidik seperti pirit (FeS_2) akan mengalami oksidasi bila terpapar udara, menghasilkan senyawa asam sulfat (H_2SO_4) dan meningkatkan kelarutan logam berat seperti besi (Fe^{2+}) dan aluminium (Al^{3+}), yang dapat bersifat toksik bagi tanaman (Engblom *et al.*, 2014). Tanah ini memiliki kejenuhan basa rendah dengan $\text{pH} < 3,5$ dan mengandung logam-logam toksik seperti besi (Fe^{2+}) dan aluminium (Al^{3+}) dalam konsentrasi tinggi. Dalam kondisi aerob (terpapar udara), proses oksidasi pirit oleh oksigen atau ion Fe^{3+} dapat dijelaskan dalam reaksi kimia:

1. $2 \text{FeS}_2 + 7 \text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Fe}^{2+} + 4 \text{SO}_4^{2-} + 4 \text{H}^+$
2. $\text{FeS}_2 + 14 \text{Fe}^{3+} + 8 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 15 \text{Fe}^{2+} + 2 \text{SO}_4^{2-} + 16 \text{H}^+$

Reaksi-reaksi tersebut menyebabkan peningkatan ion hidrogen (H^+) yang drastis, menurunkan pH tanah dan menyebabkan pelarutan logam berat yang meracuni tanaman. Ion Fe^{2+} yang larut dalam air tanah dapat mencapai konsentrasi hingga 6600 mg/kg, terutama setelah musim hujan, sementara Al^{3+} meningkatkan keasaman tanah lebih lanjut serta mengganggu ketersediaan unsur hara lain seperti P, Ca, Mg, dan K (Hidayat & Fahmi, 2020).

Pengelolaan tata air berperan penting dalam meminimalkan dampak negatif dari oksidasi pirit. Sistem irigasi satu arah (*one-way flow system*) dan sistem tabat (*overflow dam*) dikembangkan untuk mengontrol masuknya air pasang serta membuang air beracun. Selain itu, pengelolaan mikro seperti pembuatan saluran kemalir (parit cacing) dapat memperbaiki kondisi perakaran tanaman dan mencuci ion-ion toksik. Proses oksidasi pirit ditunjukkan dengan reaksi:



Tanaman mengabsorpsi besi dalam bentuk Fe^{2+} masuk melalui membran dengan cara difusi dan menuju sel korteks akar untuk menuju ke *xylem* dengan cara *simplas* maupun *apoplas*, menuju jaringan tanaman lainnya, pada jaringan daun akan membentuk reaksi oksidasi aktif seperti superoksida yang akan membuat daun menjadi kuning/mengering, untuk mencegah serapan Fe^{2+} , Fe harus di oksidasi menjadi Fe^{3+} dengan cara menaikkan pH atau dengan cara meningkatkan difusi oksigen pada lapisan *rhizosphere* (Fahmi *et al.*, 2023). Tanaman padi salah satu contohnya sangat sensitif terhadap kelebihan Fe^{2+} dan Al^{3+} , yang dalam konsentrasi tinggi menyebabkan gangguan fisiologis dan penurunan hasil. Dengan normalisasi saluran air dan pemberian dolomit 500 kg/ha, produktivitas di lahan pirit tinggi dapat ditingkatkan dari 2,4 t/ha menjadi 4,2 t/ha. Dengan demikian, keberhasilan pertanian di lahan sulfat masam sangat tergantung pada strategi pengelolaan tanah dan air yang terpadu serta pemilihan varietas adaptif (Yartiwi *et al.*, 2023).

3.2. Pengelolaan Kesuburan Tanah Pada Lahan Sulfat Masam

Lahan sulfat masam merupakan salah satu lahan marginal bagi pertanian dengan faktor pembatas yang terbentuk secara alami yang tidak dapat digunakan untuk menghasilkan produksi biomasa tanaman dan bernilai ekonomi rendah (Csikós & Tóth, 2023; Ervianti *et al.*, 2024). Faktor pembatas ini salah satunya adalah kesuburan tanah yang menurun terus-menerus apabila tidak ada perbaikan pada lahan ini (Ernawanto & Sudaryono, 2016).

Lahan sulfat masam memiliki batasan kesuburan tanah secara fisika, kimia, dan biologi, akibat adanya kandungan pirit pada tanah dan pH tanah yang rendah. Pengelolaan dan peningkatan kesuburan tanah merupakan salah satu cara untuk meningkatkan fungsi dan produktivitas lahan (Csikós & Tóth, 2023). Pengelolaan lahan sulfat masam yang baik tidak disarankan dengan melaksanakan reklamasi lahan secara intensif karena akan meningkatkan oksidasi pada tanah. Pengelolaan lahan ini lebih disarankan dengan melaksanakan perbaikan kondisi tanah dengan meningkatkan pH tanah dengan olah tanah minimum. Perbaikan kesuburan tanah utama yang harus dilaksanakan pada lahan sulfat masam adalah dengan menaikkan pH dan meningkatkan kandungan C organik pada tanah dengan penggunaan *amelioran*, *biochar*, dan penambahan bahan organik (Fahmi & Susilawati, 2018). Penggunaan *amelioran*, *biochar* dan penambahan organik telah banyak berhasil meningkatkan kesuburan tanah dan meningkatkan status lahan sulfat masam aktual menjadi lahan sulfat masam potensial untuk kegiatan budidaya. Berikut peran-peran bahan-bahan tersebut dalam meningkatkan pH tanah dan kesuburan tanah pada lahan sulfat masam.

Ameliorant dan Bahan Organik

Peranan *ameliorant* dalam mengatasi lahan sulfat masam menurut Priatmadi & Haris (2009) bahwa bahan sulfidik menunjukkan laju peningkatan keasaman yang lebih tinggi dibandingkan tanah permukaan ketika mengalami proses oksidasi secara intensif. Pada kondisi tanah yang tergenang atau memiliki kadar air tinggi, aplikasi *ameliorant* terbukti efektif dalam meningkatkan pH tanah permukaan. Sebaliknya, pada kondisi tanah yang lebih teroksidasi atau dengan kadar air yang lebih rendah, pemberian *ameliorant* berperan dalam menekan laju peningkatan keasaman baik pada tanah maupun bahan sulfidik. Selain itu, pada kondisi yang sama, aplikasi *ameliorant* juga berkontribusi terhadap peningkatan kelarutan unsur besi dalam tanah dan bahan sulfidik, yang dapat memengaruhi dinamika unsur hara dan potensi toksisitas logam pada lahan sulfat masam.

Pengapuran merupakan metode yang efisien dalam mengoreksi keasaman tanah. Selain itu, penerapan berbagai strategi pengelolaan tanaman, seperti rotasi tanaman, pengelolaan bahan organik, manajemen pemupukan, serta pemilihan varietas tanaman yang toleran terhadap kondisi asam, dapat digunakan untuk mengatasi keasaman tanah. Langkah-langkah ini tidak hanya meningkatkan produktivitas tanaman, tetapi juga mendukung terciptanya sistem pertanian yang lebih berkelanjutan dan menguntungkan (Vista *et al.*, 2024).

Ameliorasi tanah menjadi salah satu strategi penting untuk meningkatkan kesuburan tanah sulfat masam. Penggunaan kapur seperti dolomit, kapur hidrat, dan kapur bakar dapat menaikkan pH tanah dan air, meningkatkan alkalinitas, serta mengurangi kadar karbon organik. Kapur hidrat (HA) lebih efisien dalam meningkatkan pH dan alkalinitas dengan biaya yang lebih rendah dibandingkan dolomit, yang memerlukan dosis yang lebih besar untuk memperoleh hasil yang serupa (Fitriani *et al.*, 2020). Kapur, khususnya dolomit, efektif dalam menurunkan kadar Fe dan Al, namun penggunaannya dalam jumlah besar kurang efisien sehingga perlu dikombinasikan dengan bahan lain. Sumber silika, terutama dari sekam padi, berperan dalam mengurangi toksisitas Fe dan Al, meningkatkan ketahanan tanaman padi terhadap hama dan stres lingkungan, serta memperkuat sistem antioksidan tanaman. Selain itu, bahan humat sebagai *ameliorant* berperan penting dalam membentuk senyawa khelat dengan ion logam seperti Al dan Fe, sehingga menurunkan kelarutan logam beracun tersebut dan memperbaiki struktur tanah. Kombinasi kapur, silika, dan humat secara sinergis dapat meningkatkan efektivitas ameliorasi tanah sulfat masam secara lebih optimal. Formulasi ini tidak hanya meningkatkan produktivitas padi, tetapi juga mengurangi kebutuhan kapur, sehingga berkontribusi terhadap perbaikan dan keberlanjutan kesehatan tanah (Maftu'ah *et al.*, 2024).

Menurut Nugroho *et al.* (2022) selain kapur, *ameliorant* yang sering digunakan yaitu bahan organik. Pada pertanaman padi terjadi toksisitas besi yang disebabkan oleh kelebihan ion Fe^{2+} di tanah. Upaya pelindian tanah dan pemberian bahan organik (2,5 t/ha) dapat menurunkan aktivitas enzim polifenol oksidase (PPO) serta meningkatkan hasil padi. Kombinasi keduanya direkomendasikan untuk mengurangi toksisitas besi dan meningkatkan produktivitas padi. Penelitian Nurida & Rachman (2020) pengurangan dosis pupuk NPK hingga 25% tidak menurunkan hasil panen kedelai apabila disertai dengan penggunaan *ameliorant*. Dolomit terbukti efektif dalam menaikkan pH tanah, sementara biochar SP50 meningkatkan jumlah pori tanah yang menyimpan air. Kombinasi perlakuan ini dapat menurunkan kandungan aluminium dapat ditukar, meningkatkan hasil kedelai, dan ketersediaan fosfor (Sukyankij *et al.*, 2023). Perbaikan produktivitas ini terutama disebabkan oleh penurunan tingkat keasaman tanah dan peningkatan ketersediaan air di dalam tanah. Sumber *ameliorant* lainnya diketahui penggunaan air tanah mineral gambut lebih efektif dibandingkan air sungai atau air pasang besar untuk pengembangan kedelai hitam di lahan pasang surut (Pujiwati *et al.*, 2015) serta penggunaan kalsium karbonat dengan gambut dapat mengurangi dampak negatif dari lingkungan tanah masam (Högfors-Rönnholm *et al.*, 2023).

Pemanfaatan kombinasi aplikasi bakteri penambat N endofit seperti *Burkholderia tropica* L-VT08c dan *Enterobacter cloacae* N-VT01 mampu memperbaiki tanah masam dan menurunkan penggunaan pupuk nitrogen sebesar 50% tanpa mengurangi produksi nanas (Khuong *et al.*, 2024)). Pada pengembangan tanaman jagung penggunaan limbah cair pabrik kelapa sawit (LCPKS) dengan tambahan *ameliorant* zeolit dapat meningkatkan pH tanah, hara (C-organik, N-total, P, dan KTK), serta pertumbuhan jagung (bobot tajuk, biji, dan kandungan N, P,

prolin daun). LCPKS dari kolam pengasaman dengan zeolit 10% dosis 1000 ml paling efektif meningkatkan kesuburan tanah sulfat masam dan hasil jagung saat kekeringan (Nursanti & Defitri, 2024). Penambahan karbon organik dari jerami gandum juga diketahui dapat meningkatkan pH tanah sulfat masam yang teroksidasi dan menurunkan konsentrasi sulfur dan besi, namun jumlah karbon organik yang tersedia untuk mikroorganisme berkurang (Kölbl *et al.*, 2018).

Terdapat potensi dua bahan tanaman yaitu *Melastoma malabathricum* dan *Dicranopteris linearis* yang dapat meningkatkan kesuburan tanah sulfat masam. Kedua bahan tanaman ini terbukti dapat meningkatkan pH tanah, P yang tersedia, dan Ca yang dapat dipertukarkan, serta menurunkan kadar Al yang dapat dipertukarkan. Pada dosis penambahan terendah, keduanya menunjukkan efektivitas yang lebih baik daripada dolomit dalam menurunkan kandungan Fe yang tersedia dan meningkatkan kandungan N yang tersedia di tanah. Meskipun hasil tidak sebaik dolomit, namun peran bahan tanaman ini berkontribusi dalam mengubah sifat tanah sulfat masam (Sulaiman & Liew, 2025).

Biochar

Penggunaan biochar sebagai *ameliorant* dapat meningkatkan hara dan kualitas air. Biochar dapat menjadi salah satu faktor dalam perlindungan kualitas air di tanah sulfat masam (Kinnunen *et al.*, 2023). Menurut Yusran *et al.*, (2023) penggunaan biochar lebih efektif dibandingkan kompos dalam meningkatkan P, namun kombinasi biochar, kapur, dan kompos menunjukkan sinergi yang baik dalam meningkatkan kelarutan dan ketersediaan fosfor serta dapat membantu memperbaiki hara tanah di lahan sulfat masam. Penambahan ketiga bahan tersebut mampu mengurangi kemasaman tanah dan pemadatan tanah, serta meningkatkan bahan organik tanah (Dang *et al.*, 2022). Sifat tanah sulfat masam yang kurang baik, seperti berat isi (BD), porositas, kandungan FeS_2 , dan karbon organik (SOC), dapat diperbaiki melalui aplikasi biochar yang berasal dari beragam jenis dan dosis bahan lokal. Kepadatan tanah sangat dipengaruhi oleh tingkat porositasnya. Pemberian biochar sekam padi sebanyak 0,9 kg mampu meningkatkan kedua aspek tersebut, yakni porositas dan kepadatan tanah. Peningkatan ini terjadi karena bertambahnya volume pori dan luas permukaan tanah, serta terbentuknya misel tanah yang kurang stabil akibat interaksi ion ligan karbon yang berasal dari biochar (Abdillah *et al.*, 2024).

Biochar yang berasal dari sekam padi dapat meningkatkan kualitas tanah dan hasil padi, terutama di musim kemarau. Namun, pengaruhnya lebih rendah pada musim hujan karena proses pencucian, yang menunjukkan perlunya aplikasi lebih sering di daerah dengan curah hujan tinggi. Biochar efektif dalam memperbaiki kondisi tanah dan meningkatkan hasil padi, meskipun dampaknya lebih terbatas pada musim hujan (Dong *et al.*, 2024). Pengurangan keasaman dari penambahan biochar disebabkan kenaikan rasio unsur Ca terhadap Al (Manickam *et al.*, 2015) dan peningkatan signifikan K dibanding kontrol yang juga memengaruhi produktivitas tanaman padi (Maftuah & Indrayati, 2014).

Aplikasi biochar dapat meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah di lahan sulfat masam dengan memainkan peran sebagai penyerap karbon, pengikat nitrogen, pelarut fosfat, pereduksi besi dan sulfur yang berguna dalam mendukung pertumbuhan tanaman. Pemanfaatan mikroorganisme dalam pengelolaan lahan sulfat masam juga diperlukan untuk memperbaiki dan menjaga kestabilan hara agar berada pada pH yang sesuai. Beberapa famili bakteri—seperti *Acidothermaceae* dan *Acidimicrobiaceae*—dominan di tanah yang sangat masam dapat dimanfaatkan sebagai bioinokulan berbasis mikroba lokal spesifik guna mendukung pemulihan tanah dan meningkatkan hasil pertanian secara berkelanjutan (Varghese *et al.*, 2024). Selain itu, telah diidentifikasi bakteri pereduksi sulfat sebagai solusi potensial untuk menangani kondisi asam di daerah drainase pertambangan. Bakteri ini mereduksi sulfat menjadi sulfida dalam kondisi anaerobik, yang kemudian berinteraksi dengan ion logam dalam air dan membentuk endapan yang tidak larut. Jenis bakteri yang berperan dalam proses ini meliputi *Desulfosporosinus*, *Desulfovibrio*, dan *Desulfotomaculum*. Proses reduksi sulfat menghasilkan tingkat efisiensi yang tinggi dengan rentang 74,8% hingga 100%, serta efektif dalam mengurangi logam dan metaloid seperti besi (Fe), tembaga (Cu), arsenik (As), dan terutama seng (Zn).

3.3. Pengelolaan Air pada Lahan Sulfat Masam

Manajemen air tanah pada lahan sulfat masam merupakan aspek kritis untuk mencegah oksidasi mineral sulfida seperti pirit (FeS_2) yang dapat menghasilkan asam sulfat dan melepaskan logam berat beracun ke lingkungan. Penurunan muka air tanah yang terlalu cepat dapat meningkatkan oksidasi pada tanah dan menyebabkan penurunan pH serta melarutkan logam-logam berat ((Fahmi & Susilawati, 2018; Michael, 2013; Nita *et al.*, 2019). Pada lahan pasang surut pengelolaan air juga sangat penting selain menjaga dari dampak oksidasi pirit juga salinitas pada air (Susilawati & Nursyamsi, 2014). Pengelolaan pengairan yang tidak tepat juga dapat menyebabkan tercucinya tanah sulfat masam. Penurunan pH tanah dan air tanah ekstrem terjadi pada saat musim hujan setelah musim kemarau. Pada saat musim kering pori-pori tanah membesar, oksigen kemudian dapat mudah masuk mengisi pori-pori tanah dan bereaksi dengan endapan sulfida yang menyebabkan pirit teroksidasi (Engblom *et al.*, 2014). Oksidasi sulfida yang terakumulasi pada permukaan tanah di musim kemarau akan terbawa oleh

aliran permukaan atau infiltrasi kedalam hingga masuk menuju air tanah. Pencucian yang terjadi pada saat musim hujan menyebabkan pH air permukaan dan air tanah menurun dan kelarutan logam berat (Al, Fe, Cd) meningkat pada air tanah dan air permukaan yang dapat menyebabkan keracunan pada biota di sekitarnya (Imanudin *et al.*, 2023; Virtanen *et al.*, 2014).

Pengelolaan air irigasi dapat dilaksanakan dengan beberapa cara yaitu dengan drainase terkontrol, irigasi bawah permukaan, dan pencegahan aliran *bypass* pada tanah sulfat masam. Drainase terkontrol dilaksanakan dengan cara mengatur tinggi muka air tanah untuk mengurangi oksidasi sulfida. Irigasi bawah permukaan dilaksanakan dengan cara memompa air ke dalam tanah untuk menjaga ketinggian air tanah. Pencegahan aliran *bypass* dengan menggunakan lembaran plastik vertikal untuk mencegah aliran air langsung ke saluran drainase utama (Österholm *et al.*, 2015).

Budidaya jenuh air

Pengelolaan drainase terkontrol adalah dengan melaksanakan budidaya jenuh air. Budidaya jenuh air (BJA) adalah teknologi budidaya dengan mengatur tinggi muka air secara tetap dengan sistem irigasi tidak terputus dengan (sekitar 5-10 cm dibawah lapisan permukaan tanah) (Ghulamahdi *et al.*, 2009; Noya *et al.*, 2014). BJA memberikan air secara kontinu dan posisi air yang tetap akan meningkatkan pertumbuhan tanaman, akibat adanya perbaikan status air tanah (Endriani *et al.*, 2017). Teknologi budidaya ini akan memberikan dampak pada sifat fisik, kimia, dan biologi tanah, ketinggian 20 cm dari permukaan tanah akan menjaga kondisi tanah tereduksi. Kondisi tanah yang teririgasi terus menerus dan menjaga level air dibawah permukaan tanah sehingga perakaran dalam kondisi tercukupi air akan meningkatkan kesuburan tanah karena mencegah Al dan Fe dalam bentuk terlarut dan adanya peningkatan pH sehingga unsur hara lain akan tersedia seperti P, K, Ca, Mg (Haitami *et al.*, 2023).

Pada lahan sulfat masam penanaman kedelai tanpa menggunakan pengaturan budidaya jenuh air menyebabkan tanaman hanya dapat tumbuh sampai dengan 4 minggu setelah tanam (mst). Penggunaan kapur sebagai *ameliorant* dan pengaturan kedalaman muka air sebanyak 10 cm dapat meningkatkan pertumbuhan vegetatif dan hasil sebesar 2,4 t/ ha pada varietas Tanggamus dibandingkan penggunaan amelioran jenis lain dan tanpa mempertahankan kejenuhan air di Riau (Noya *et al.*, 2014). Kandungan Ca^{2+} pada kapur apabila diberikan pada tanah yang berekasi dengan air akan menghasilkan mekanisme netralisasi pada kemasaman tanah, dan melepaskan ion OH^- . pH tinggi akan meningkatkan proses sedimentasi lahan sulfat masam teroksidasi (Fahmi *et al.*, 2018; Sari *et al.*, 2023).

Ketinggian permukaan air mempengaruhi pertumbuhan kedelai pada tanaman kedelai di lahan pasang surut tipe luapan C, kondisi tinggi muka air lebih dari 20 cm menyebabkan terjadinya penurunan enzim nitrate reduktase, dan peningkatan proline sebagai senyawa untuk pencegahan stress pada tanaman. Peningkatan proline ini disebabkan adanya *sisntesis de novo* pada tanaman (Mapegau *et al.*, 2023). Pada tanaman sorgum untuk beradaptasi pada lahan sulfat masam basah sangat di pengaruhi oleh kedalaman permukaan tanah. Perlakuan tinggi muka air tanah 10 cm dan tinggi bedengan 35 cm memberikan respon terbaik pada pertumbuhan tanaman sorgum dengan meningkatkan berat malai pertanaman menjadi 144,60 gr (Susilo *et al.*, 2023). Pada penanaman bawang merah ketinggian permukaan air 20 cm dari permukaan tanah lebih baik dalam meningkatkan pertumbuhan dan hasil bawang merah, karena pada ketinggian ini *aerinkima* di produksi lebih besar. *Aerinkima* yang besar akan mempermudah difusi oksigen dari tanaman ke *rhizospher*, dan meningkatkan pembentukan plak pada akar bawang merah yang dapat berperan untuk mengoksidasi Fe^{2+} pada tanah (Haitami *et al.*, 2023). Pemberian *ameliorant*, dolomit dan aktinobakteri dapat meningkatkan produktivitas pada tanaman bawang merah di lahan pasang surut sulfat masam sebesar 8,42 t/ha, dengan menggunakan varietas bima brebes (Haitami *et al.*, 2024). Penggunaan budidaya jenuh air pada tanaman bawang merah menjamin ketersediaan air bagi perakaran tanaman, dan mencegah reduksi pirit yang dapat meracuni tanaman.

Irigasi Bawah Permukaan

Irigasi bawah permukaan merupakan salah satu metode irigasi dengan memanfaatkan daya kapilaritas air untuk menarik air tanah langsung ke daerah perakaran tanaman guna memaksimalkan penyerapan air oleh tanaman (Bin Zainal Abidin *et al.*, 2014; Dalhem *et al.*, 2019). Irigasi ini dibuat menggunakan pipa *sheet-pipe* (pipa plastik berlubang) yang dipasang secara horizontal dengan mesin *mole drainer*, menghasilkan drainase alami tanpa penggalian tanah besar-besaran (Arif *et al.*, 2021). Irigasi bawah tanah ini dapat diaplikasikan pada lahan pasang surut tipe B, C, dan D (Efriandi, 2018). Penggunaan irigasi bawah tanah ini memastikan kondisi perakaran tetap jenuh air ketika sedang musim kering. Pada musim kemarau umumnya permukaan air tanah akan menurun 1-1,5 m dan ini akan mempengaruhi kapasitas lapang pada tanah, pada saat air tidak tersedia di perakaran reaksi oksidasi pirit akan meningkat dan menyebabkan pH menurun di sekitar perakaran (Österholm *et al.*, 2015). Penggunaan irigasi bawah tanah ini akan memastikan ketersediaan air pada daerah sekitar perakaran dan memperbaiki aerasi di sekitar wilayah perakaran (Arif *et al.*, 2021). Aerasi sangat penting bagi pertumbuhan akar di dalam tanah, namun aerasi yang disebabkan oleh kondisi air di sekitar perakaran yang tidak stabil, karena ada fase pengeringan dan pengairan, akan meningkatkan oksidasi pirit (Lestari *et al.*, 2016). Pada lahan sulfat masam irigasi ini memiliki

kelemahan karena adanya oksidasi pada bagian permukaan tanah sehingga membutuhkan *ameliorant* untuk menurunkan keasaman tanah di permukaan ((Österholm *et al.*, 2015). Irigasi bawah tanah juga menurunkan kelarutan garam pada tanah, hal ini sangat cocok bagi lahan-lahan rawa pasang surut untuk menghindari intrusi air laut (Efriandi, 2018).

Metode irigasi bawah permukaan ini sudah banyak diterapkan pada komoditas-komoditas budidaya khususnya tanaman hortikultura seperti pada tomat (Perdikaki *et al.*, 2018), kangkung, caisim, bayam (Syafriyandi *et al.*, 2023), pakcoy (Bilqist Caroline & Chusnul Arif, 2023). Pada tanaman pangan irigasi ini sudah pernah diterapkan pada tanaman padi. Metode irigasi ini meningkatkan aerasi di sekitar perakaran tanaman padi yang umumnya anaerobik menjadi aerobik, sehingga meningkatkan pertumbuhan dan hasil tanaman padi. Peningkatan hasil dicapai hingga mencapai 13% dari budidaya padi secara biasa (Arif *et al.*, 2021). Pada tanaman tebu penggunaan irigasi bawah tanah dapat meningkatkan tinggi tanaman dan efisiensi penggunaan air (Gunarathna *et al.*, 2018). Penggunaan irigasi ini juga memungkinkan untuk dilaksanakan secara presisi dengan mempertimbangkan jenis tanaman dan kebutuhan air tanaman sehingga dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air dan membuat cadangan air bagi tanaman dengan metode pompa pipa hidrolik (Bin Zainal Abidin *et al.*, 2014).

3.4. Rekomendasi Teknik Pengelolaan Lahan Sulfat Masam

Lahan sulfat masam yang terdapat di Kalimantan Barat merupakan salah satu lahan sub marjinal yang banyak diusahakan petani untuk kegiatan budidaya pertanian secara bijaksana. Lahan sulfat masam banyak ditemukan di lahan pasang surut dimana aktivitas pirit oksidasinya tinggi. Pengelolaan lahan yang tepat untuk budidaya tanaman sangat diperhatikan agar tanaman yang diproduksi tumbuh secara optimal. Beberapa pengelolaan yang telah dilakukan untuk mengatasi kondisi lahan sulfat masam banyak diterapkan di daerah Sumatra, Riau, dan wilayah yang memiliki topografi lahan basah suboptimal. Dengan menghimpun literasi penelitian yang sudah ada selama ini, dapat dipetakan pengelolaan yang sesuai dan dapat diterapkan untuk pengembangan pertanian di Kalimantan Barat (Tabel 1).

Tabel 1. Penelitian-penelitian mengenai pengelolaan lahan sulfat masam

No	Lokasi	Komoditas	Perlakuan/Mekanisme	Hasil	Sumber Pustaka
1	Kalimantan Selatan	Padi	Pemupukan: NPK= 100% dan 75% Dosis 100%: 200 Urea; 100 SP 36; 100 KCl <i>Ameliorant</i> : B0= Tanpa bahan organik, B1=Polapetani, B2=Kompos (kombinasi kompos Jerami 30%+ Kompos Purun 30%+ Kompos Kotoran Sapi 40%), B3=Biochar sekam padi	Gabah tertinggi diperoleh pada Pengelolaan intensif, pe% dan penggunaan B2 (Kombinasi kompos jerami+Kompos purun+Kompos Kotoran Sapi) sebesar 3,4 t/ha dengan nilai indeks produksi padi sebesar 438,9 dan emisi metana sebesar 7,75 kg/ha musim	Annisa & Nursyamsi (2016)
2	Kalimantan Barat	Padi	<i>Ameliorant</i> : Lumpur laut dan biochar sekam padi Pemupukan: Kompos Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)	Gabah tertinggi diperoleh pada aplikasi kompos TKKS, lumpur laut, dan arang sekam padi sebanyak 10 t/ha) dengan	Andayani & Hayat (2019)

3	Kalimantan Barat	Padi	Penggunaan Varietas Unggul Baru Baroma, Inpari IR Nutri Zinc, dan Inpago 9	berat yaitu 346,3 gram/m ² Inpari IR Nutri Zinc menghasilkan produktivitas GKP 4,0 t/ha	Subekti et al. (2021)
4	Kalimantan Barat	Padi	<i>Ameliorant</i> dengan <i>Chromolaena odorata</i> , jerami, sekam padi, abu sekam padi. u kontrol, C. odorata (10 t/ha), jerami (10 t/ha), biochar sekam padi (10 t/ha), abu sekam, padi (10 t/ha), C. odorata (10 t/ha) + biochar sekam padi (5 t/ha), jerami (10 t/ha) + biochar sekam padi (5 t/ha), C. odorata (10 t/ha) + abu sekam padi (5 t/ha), dan jerami (10 t/ha) + abu sekam padi (5 t/ha).	Perlakuan C. odorata (10 t/ha) + biochar sekam padi (5 t/ha) memberikan efek jangka panjang atau efek residu terbaik terhadap pertumbuhan tanaman padi pada periode tanam kedua.	Masulili et al. (2024)
15	Kalimantan Selatan	Padi	<i>Ameliorant</i> : Biochar sekam padi, biochar purun tikus, biochar tandan kosong kelapa sawit dengan dosis 0; 0,9; 1,8; 2,7 kg/10 m ² .	Biochar sekam padi efektif memperbaiki tanah sulfat masam, dengan dosis optimal 1,8 kg per petak untuk budidaya padi IR-Zinc.	Abdillah et al. (2024)
6	Kalimantan Barat	Padi	<i>Ameliorant</i> : (1) Kontrol tanpa pemberian amelioran (Co) (2) Jerami padi (RS), 15 t/ha (3) Sekam padi (RH), 15t/ha (4) Abu sekam padi (RHA), 10 t/ha (5) Biochar dari sekam padi (RHB), 10 t/ha (6) <i>Chromolaena odorata</i> (Chr), 15 t/ha	Aplikasi sekam padi dan bahan organik lainnya di tanah sulfat masam Kalimantan Barat secara signifikan memperbaiki sifat tanah dengan menurunkan kepadatan dan toksisitas logam, serta meningkatkan pH, unsur hara, dan kapasitas tukar kation.	Masulili (2010)

4. Kesimpulan & Rekomendasi

4.1. Kesimpulan

Pengelolaan lahan sulfat masam di Kalimantan Barat untuk meningkatkan ketahanan pangan dapat dilaksanakan dengan memperbaiki kesuburan tanah dan melaksanakan pengelolaan air. Keberhasilan-keberhasilan di daerah lain dapat di adopsi untuk meningkatkan produktivitas pangan Kalimantan Barat. Teknik yang di usulkan dalam pengelolaan adalah penggunaan *ameliorant* dan *biochar* untuk meningkatkan pH tanah, menurunkan kelarutan logam berat seperti Al dan Fe, dan membuat unsur hara tersedia bagi tanaman. Penggunaan bahan organik berperan untuk mengkhelat logam berat, meningkatkan kandungan bahan organik tanah dan memperbaiki struktur tanah. Pengelolaan air dapat dilaksanakan dengan menggunakan metode budidaya jenuh air agar tanah selalu jenuh air dan menghindari oksidasi pirit. Pada lahan rawa pasang surut dapat menggunakan metode irigasi bawah permukaan tanah guna menghindari adanya intrusi air laut dan menjaga ketersediaan air di sekitar perakaran.

4.2. Rekomendasi

Rekomendasi yang disarankan pada pengelolaan lahan sulfat masam di Kalimantan Barat adalah dengan melaksanakan kegiatan pengelolaan kesuburan tanah dan pengelolaan sumber daya air di lahan. Pengelolaan kesuburan tanah di rekomendasikan menggunakan *ameliorant* berupa kapur pertanian, *biochar*, dan penggunaan bahan organik. Penggunaan *ameliorant*, *biochar* dan pupuk organik harus diberikan pada awal sebelum penanaman untuk menurunkan reaksi oksidasi sulfida pada tanah sulfat masam. Pengelolaan sumber daya air perlu dilaksanakan untuk memastikan sedimen sulfida selalu dalam kondisi tereduksi. Pengelolaan tinggi muka air menjadi rekomendasi terbaik dengan ketinggian muka air tanah antara 10-20 cm. Penggabungan penggunaan *ameliorant* (kapur pertanian, bahan organik, *biochar*) dengan pengelolaan air adalah rekomendasi terbaik dalam pengelolaan lahan sulfat masam.

Daftar Referensi

- Abdillah, M. H., Lukmana, M., Rahmawati, L., & Iskarlia, G. R. (2024). Changes in Acid-Sulfate Soil Characteristics with Biochar from Various Materials and their Effect on IR-Zinc Production. In <https://agrivita.ub.ac.id/index.php/agrivita/article/view/4258/1771>.
- Andayani, S., & Hayat, E. S. (2019). Pengayaan kompos tandan kosong kelapa sawit dengan lumpur laut dan biochar sekam padi pada tanaman padi di tanah sulfat masam. *AGRITECH*, 21(1), 45–54.
- Annisa, W., Mukhlis, M., & Hairani, A. (2021). Biochar-Materials for Remediation on Swamplands: Mechanisms and Effectiveness. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 15(1), 13. <https://doi.org/10.21082/jsdl.v15n1.2021.13-22>.
- Annisa, W., & Nursyamsi, D. (2016). View of Pengaruh Amelioran, Pupuk dan Sistem Pengelolaan Tanah Sulfat Masam terhadap Hasil Padi dan Emisi Metana. In *Jurnal Tanah dan Iklim* (pp. 135–145). <https://epublikasi.pertanian.go.id/berkala/index.php/jti/article/view/3181/3215>.
- Arif, C., Setiawan, B. I., Saptomo, S. K., Matsuda, H., Tamura, K., Inoue, Y., Hikmah, Z. M., Nugroho, N., Agustiani, N., & Suwarno, W. B. (2021). Performances of sheet-pipe typed subsurface drainage on land and water productivity of paddy fields in Indonesia. *Water (Switzerland)*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/w13010048>.
- Bilqist Caroline, M., & Chusnul Arif, dan. (2023). Optimasi Sistem Irigasi Bawah Permukaan untuk Peningkatan Produktivitas Tanaman dan Air dengan Algoritma Genetika. *Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 8(2), 86–95. <https://doi.org/10.29244/jsil.8.2.85-94>.
- Bin Zainal Abidin, M. S., Shibusawa, S., Ohaba, M., Li, Q., & Bin Khalid, M. (2014). Capillary flow responses in a soil-plant system for modified subsurface precision irrigation. *Precision Agriculture*, 15(1), 17–30. <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9309-6>.
- Csikós, N., & Tóth, G. (2023). Concepts of agricultural marginal lands and their utilisation: A review. In *Agricultural Systems* (Vol. 204). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103560>.
- Dalhem, K., Engblom, S., Stén, P., & Österholm, P. (2019). Subsurface hydrochemical precision treatment of a coastal acid sulfate soil. *Applied Geochemistry*, 100, 352–362. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOCHEM.2018.12.005>.
- Dang, L. Van, Ngoc, N. P., & Hung, N. N. (2022). Effects of Biochar, Lime, and Compost Applications on Soil Physicochemical Properties and Yield of Pomelo (*Citrus grandis* Osbeck) in Alluvial Soil of the Mekong Delta. *Applied and Environmental Soil Science*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5747699>.
- Dong, H. P., Nguyen, B. T., Le, A. H., & Dinh, G. D. (2024). Seasonal variation-dependent biochar impacts on coastal acid-sulfate soil in paddy fields and the consequences on rice growth and yield. *Geoderma Regional*, 39. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00878>.

- Efriandi. (2018). Uji Kemampuan Pengaliran Air Pipa Berlubang untuk Sistem Irigasi Bawah Tanah di Lahan Pasang Surut. *Prosiding Seminar Nasional Hari Air Sedunia*, 72–78.
- Endriani, E., Ghulamahdi, M., & Sulistyono, E. (2017). Peningkatan produktivitas kedelai varietas tanggamus dengan teknologi budidaya jenuh air di lahan rawa lebak dangkal. *Prosiding Seminar Nasional Agroinovasi Spesifik Lokasi Untuk Ketahanan Pangan Pada Era Masyarakat Ekonomi ASEAN*, 1211–1221.
- Engblom, S., Sten, P., Osterholm, P., Rosendahl, R., & Lall, K.-E. (2014). Subsurface Chemigation of Acid Sulfate Soils—a New Approach to Mitigate Acid and Metal Leaching. *Soils Embrace Life and Universe*, 1–2.
- Ernawanto, Q. D., & Sudaryono, T. (2016). Rehabilitasi lahan marginal dalam rangka meningkatkan produktivitas dan konservasi air. *Prosiding Seminar Nasional Membangun Pertanian Modern Dan Inovatif Berkelanjutan Dalam Rangka Mendukung MEA*, 598–605.
- Ervianti, E. Y., Reniati, N., & Yoga, T. (2024). Menggali potensi pemanfaatan lahan marginal menjadi lahan produktif dalam rangka mempertahankan ketersediaan pangan di masa mendatang. *SEPA: Jurnal Sosial Ekonomi Pertanian Dan Agribisnis*, 21(1), 89. <https://doi.org/10.20961/sepa.v21i1.64846>.
- Fahmi, A., Alwi, M., Nursyamsi, D., Karet, J. K., & Utara, L. (2018). The Role of Inundation Types of Tidal Swampland on the Chemical Properties of Potentially Acid Sulphate Soils under Fertilizer and Lime Application. *J Trop Soils*, 23(2), 55–64. <https://doi.org/10.5400/jts.2018.v23i2.55>.
- Fahmi, A., Hairani, A., Alwi, M., & Nurzakiah, S. (2023). Fe-P pools as phosphorus source for rice in acid sulfate soils. In *Chilean Journal of Agricultural Research* (Vol. 83, Issue 5, pp. 626–634). Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392023000500626>.
- Fahmi, A., & Susilawati, A. (2018). Environmental friendly management of acid sulphate soils. In I. F. Yunianti, U. Mardiyah, Sukarjo, & Yulianing (Eds.), *Innovation of Environmental-Friendly Agricultural Technology Supporting Sustainable Food Self-Sufficiency*. IAARD Press.
- Fitriani, M., Wudtisin, I., & Kaewnern, M. (2020). The impacts of the single-use of different lime materials on the pond bottom soil with acid sulfate content. *Aquaculture*, 527. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735471>.
- Francis-Baldesari, C. (2006). *Systematic Review of Qualitative Literature*. UK Cochrane Center.
- Ghulamahdi, M., Melati, M., & Sagala, D. (2009). Production of Soybean Varieties under Saturated Soil Culture on Tidal Swamps. *Jurnal Agronomi Indonesia*, 37(3), 226–232. <https://www.researchgate.net/publication/228675465>.
- Gunarathna, M. H. J. P., Sakai, K., Nakandakari, T., Momii, K., Onodera, T., Kaneshiro, H., Uehara, H., & Wakasugi, K. (2018). Optimized subsurface irrigation system: The future of sugarcane irrigation. *Water (Switzerland)*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/w10030314>.
- Haitami, A., Ghulamahdi, M., Sopandie, D., Susila, A. D., & Lestari, Y. (2023). Determination of the Tolerance of Shallot Varieties at Water Level Depth by Water-saturated Cultivation in Tidal Land. *Universal Journal of Agricultural Research*, 11(5), 829–835. <https://doi.org/10.13189/ujar.2023.110508>.
- Haitami, A., Ghulamahdi, M., Sopandie, D., Susila, A. D., & Lestari, Y. (2024). Yield Response and Nutrient Uptake of Shallots by Giving Ameliorants and Actinobacteria in Water Saturated Cultivation in Tidal Land. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1359(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1359/1/012006>.
- Hidayat, A. R., & Fahmi, A. (2020). Impact of Land Reclamation on Acid Sulfate Soil and Its Mitigation. In D. H. Mursyidin & E. Badruzsaufari (Eds.), *1st International Conference on Tropical Wetland Biodiversity and Conservation* (Vol. 20, Issue 01002, pp. 1–5). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202001002>.
- Högfors-Rönnholm, E., Stén, P., Christel, S., Fröjdö, S., Lillhonga, T., Nowak, P., Österholm, P., Dopson, M., & Engblom, S. (2023). Targeting oxidation sites on boreal acid sulfate soil macropore surfaces mitigates acid and metal release to recipient water streams. *Applied Geochemistry*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105779>.
- Imanudin, M. S., Bakri, B., Madjid, A., Warsito, W., Sahil, M. A., & Hermawan, A. (2023). Perbaikan Kualitas Lahan pada Berbagai Kelas Hidrotopografi di Lahan Rawa Pasang Surut Delta Salek Banyuasin, Sumatera Selatan. *Agrikultura*, 34(3), 445. <https://doi.org/10.24198/agrikultura.v34i3.47018>.
- Khuong, N. Q., Tuong, N. V., Nhi, M. K., Xuan, L. N. T., Thu, L. T. M., Quang, L. T., & Phong, N. T. (2024). Potency of endophytic nitrogen-fixing bacteria Burkholderia tropica L-VT08c and Enterobacter cloacae N-VT01 in improving soil fertility and pineapple yield on acid sulfate soil. *Scientia Horticulturae*, 331. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113153>.

- Kinnunen, N., Laurén, A., Pumpanen, J., Nieminen, T. M., & Palviainen, M. (2023). Purification of Acid Sulfate Soil Runoff Water Using Biochar: a Meso-Scale Laboratory Experiment. *Water, Air, and Soil Pollution*, 234(8). <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06519-x>.
- Kölbl, A., Marschner, P., Mosley, L., Fitzpatrick, R., & Kögel-Knabner, I. (2018). Alteration of organic matter during remediation of acid sulfate soils. *Geoderma*, 332, 121–134. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.06.024>.
- Lestari, Y., Ma'as, A., Purwanto, B. H., & Utami, S. N. H. (2016). Pengaruh Aerasi Tanah Sulfat Masam Potensial Terhadap Pelepasan SO_4^{2-} , Fe^{2+} dan Al^{3+} . *Jurnal Tanah Dan Iklim*, 40(1), 25–34.
- Maftuah, E., & Indrayati, L. (2014). The use of biochar for improve soil properties and growth of paddy in peatland. In *Agrivita*.
- Maftu'ah, E., Saleh, M., Sulaeman, Y., Napisah, K., Agustina, R., Mukhlis, M., Anwar, K., Ningsih, R. D., Masganti, M., Maharani, P. H., Asikin, S., Karolinoerita, V., Wakhid, N., Hayati, A., & Lestari, Y. (2024). Si-Humate as soil ameliorant to improve the properties of acid sulfate soil, growth, and rice yield. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 84(2), 267–280. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392024000200267>.
- Manickam, T., Cornelissen, G., Bachmann, R. T., Ibrahim, I. Z., Mulder, J., & Hale, S. E. (2015). Biochar application in Malaysian sandy and acid sulfate soils: Soil amelioration effects and improved crop production over two cropping seasons. *Sustainability (Switzerland)*, 7, 16756–16770. <https://doi.org/10.3390/su71215842>.
- Mapegau, M., Hayati, I., Ichwan, B., Nusifera, S., & Nasamsir, N. (2023). Nitrogen metabolism of soybean at saturated soil culture and watering cultivation of farmer's system in conditions of tidal land. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, 137(5), 109–118. <https://doi.org/10.18551/rjoas.2023-05.11>.
- Masganti, Noor. M., Alwi, M., Mukhlis, Maftu'ah, E., Simatupang, S., & Sosiawan, H. (2020). *Optimasi Lahan Rawa Akselerasi Menuju Lumbung Pangan Dunia 2045* (hidayati, Ed.; 1st ed.). Rajawali Press.
- Masulili, A. (2010). <rice husk biochar Kalimantan.pdf>. *Journal of Agriculture Science*, 2, 39–47.
- Masulili, A. (2015). Pengelolaan lahan sulfat masam untuk pengembangan pertanian. *Jurnal Agrosans*, 12, 1–13.
- Masulili, A., Irianti, A. T. P., Abdurrahman, T., & Suci, U. (2024). Pertumbuhan Tanaman Padi pada Dua Periode Tanam di Tanah Sulfat Masam dengan Perlakuan Biochar Sekam Padi dan Beberapa Amandemen Organik. *Agrikultura*, 35(2), 377–386. <https://doi.org/10.24198/agrikultura.v35i2.55752>.
- Michael, P. S. (2013). Ecological Impacts and Management of Acid Sulphate Soil: A Review. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 10(4), 13–24. https://doi.org/10.3233/AJW-2013-10_4_03.
- Michael, P. S., Fitzpatrick, R. W., & Reid, R. J. (2016). The importance of soil carbon and nitrogen for amelioration of acid sulphate soils. *Soil Use and Management*, 32(1), 97–105. <https://doi.org/10.1111/sum.12239>.
- Nita, L., Grozav, A., & Rogobete, G. (2019). Natural and Anthropogenic Soil Acidification in the West of Romania. In *Rev.Chim. (Bucharest)*, (Vol. 70, Issue 6). <http://www.revistadechimie.ro2237>.
- Noya, A. I., Ghulamahdi, M., Sopandie, D., Sutandi, A., & Melati, M. (2014). Pengaruh Kedalaman Muka Air dan Amelioran terhadap Produktivitas Kedelai di Lahan Sulfat Masam. *Jurnal Pangan*, 23(2), 120–133. <http://www.jurnalpangan.org>.
- Nugroho, N., Kurniasih, B., Utami, S. N. H., & Yusuf, W. A. (2022). The potential of organic matter and water management on the alleviation of iron toxicity in rice plants. *Ilmu Pertanian (Agricultural Science)*, 7(1), 47. <https://doi.org/10.22146/ipas.64252>.
- Nurida, N. L., & Rachman, A. (2020). Amelioration of Acid Upland to Increase Soil Productivity and Soybean Yield. In *Agrivita*.
- Nursanti, I., & Defitri, Y. (2024). Corn (*Zea mays* L.) Response of Palm Oil Mill Effluent Plus Zeolite, and Water Availability in Potential Acid Sulphate Soil. In *Agrivita*.
- Österholm, P., Virtanen, S., Rosendahl, R., Uusi-Kämpä, J., Ylivainio, K., Yli-Halla, M., Mäensivu, M., & Turtola, E. (2015). Groundwater management of acid sulfate soils using controlled drainage, by-pass flow prevention, and subsurface irrigation on a boreal farmland. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science*, 65, 110–120. <https://doi.org/10.1080/09064710.2014.997787>.
- Perdikaki, M., Kallioras, A., Monokrousou, K., Christoforidis, C., Iossifidis, D., Bizani, E., Zafeiropoulos, A., Dimitriadis, K., Raat, K., Berg, G. van den, & Makropoulos, C. (2018). Integrated Subsurface Water Solutions for Coastal Wetland Restoration through Integrated Pump&Treat and Aquifer Storage and Recovery (ASR). *3rd EWaS International Conference on "Insights on the Water-Energy-Food Nexus,"* 665. <https://doi.org/10.3390/proceedings2110665>.
- Priatmadi, B. J., & Haris, A. (2009). Reaksi Pemasaman Senyawa Pirit pada Tanah Rawa Pasang Surut. *Journal of Tropical Soils*, 14(1), 19. <https://doi.org/10.5400/jts.2009.v14i1.19-24>.

- Pujiwati, H., Ghulamahdi, M., Yahya, S., Aziz, S. A., & Haridjaja, O. (2015). The application of peaty mineral soil water in improving the adaptability of black soybean toward aluminium stress on tidal mineral soil with saturated water culture. In *Agrivita*.
- Ritung, S., Suryani, E., Subardja, D., Sukarman, Nugroho, K., Suprpto, Hikmatullah, Mulyani, A., Tafakresnanto, Sulaeman, Y., Subandiono, R. E., Wahyunto, Ponidi, Prasodjo, N., Suryana, U., Hidayat, H., Priyono, A., & Supriatna, W. (2015). *Sumber Daya Lahan Pertanian Indonesia: Luas, Penyebaran, dan Potensi Ketersediaan* (E. Husen, F. Agus, & D. Nursyamsi, Eds.; 1st ed.). IAARD Press.
- Sari, D. M., Karlina, & Jayadi, R. (2023). Study of Tidal and Water Quality in Acid Sulphate Soil of Unit Tamban Lowland Irrigation Area Central Kalimantan. *Proceedings of the International Conference on Sustainable Environment, Agriculture and Tourism (ICOSEAT 2022)*, 26. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-086-2_18.
- Subekti, A., Kartinaty, T., & Muflih, M. A. (2021). View of keragaan varietas unggul baru padi pada lahan sub optimal pasang surut di Kalimantan Barat. *Hijau Cendekia*, 6(1), 6–11. <https://doi.org/10.32503/hijau.v6i1.1451>.
- Sudrajat, J., & Gafur, S. (2020). Tidal Swamps Development in West Kalimantan: Farmers Prefer A Rational-Moderately Strategy. *Indonesia Journal of Geography*, 52(2), 269–279. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.22146/ijg.46148>.
- Suharta, N. (2007). Sifat dan Karakteristik Tanah dari Batuan Sedimen Masam di Provinsi Kalimantan Barat serta Implikasinya terhadap Pengelolaan Lahan The Characteristic of Soil Developed from Felsic Sediments in West Kalimantan Province and Its Implication to Land Management. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 25, 11–26.
- Sukyankij, S., Sukyankij, S., & Panich-pat, T. (2023). Effect of Co-Fertilizer Application and Dolomite Amendments on Yield and Grain Quality of Rice Grown on Post-Active Acid Sulfate Soil. In *Agrivita*.
- Sulaeman, Y., Maftuáh, E., Noor, M., Hairani, A., Nurzakiah, S., Mukhlis, M., Anwar, K., Fahmi, A., Saleh, M., Khairullah, I., Rumanti, I. A., Alwi, M., Noor, A., & Ningsih, R. D. (2024). Coastal Acid-Sulfate Soils of Kalimantan, Indonesia, for Food Security: Characteristics, Management, and Future Directions. In *Resources* (Vol. 13, Issue 3). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/resources13030036>.
- Sulaiman, S., & Liew, K. (2025). Evaluating the effects of Melastoma malabathricum and Dicranopteris linearis as amendments for acid sulfate soil. *Soil Advances*, 3, 100035. <https://doi.org/10.1016/j.soilad.2025.100035>.
- Susilawati, A., & Nursyamsi, D. (2014). Sistem Surjan: Kearifan Lokal Petani Lahan Pasang Surut dalam Mengantisipasi Perubahan Iklim. In *Jurnal Sumberdaya Lahan* (pp. 31–42).
- Susilo, E., Pujiwati, H., & Rita, W. (2023). Dampak Tinggi Muka Air dan Bedengan di Lahan Rawa Terhadap Pertumbuhan dan Hasil Sorgum. *Agro Bali : Agricultural Journal*, 6(1), 116–128. <https://doi.org/10.37637/ab.v6i1.1169>.
- Syafriyandi, D., Setiawan, B. I., Arif, C., & Suwardi, S. (2023). Performance of Automatic Unpowerer Subsurface Irrigation on Water-Lettuce, Choy-Sum, and Spinach Cultivations. *Jurnal Keteknik Pertanian*, 11(3), 268–278. <https://doi.org/10.19028/jtep.011.3.268-278>.
- Varghese, E. M., Kour, B., Ramya, S., Krishna, P. D., Nazla, K. A., Sudheer, K., Anith, K. N., Jisha, M. S., & Ramakrishnan, B. (2024). Rice in acid sulphate soils: Role of microbial interactions in crop and soil health management. In *Applied Soil Ecology* (Vol. 196). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105309>.
- Virtanen, S., Simojoki, A., Hartikainen, H., & Yli-Halla, M. (2014). Response of pore water Al, Fe and S concentrations to waterlogging in a boreal acid sulphate soil. *Science of the Total Environment*, 485–486, 130–142. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.071>.
- Vista, S. P., Gaihre, Y. K., & Dahal, K. R. (2024). Plant Nutrient Availability in Acid Soil and Management Strategies. In *Climate Change and Soil-Water-Plant Nexus* (pp. 331–353). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-6635-2_11.
- Widada, A. W., Masyhuri, M., & Mulyo, J. H. (2017). Determinant Factors of Food Security in Indonesia. *Agro Ekonomi*, 28(2), 205–219. <https://jurnal.ugm.ac.id/jae/article/view/26245/19506>.
- Yartiwi, Ghulamahdi, M., Sulistyono, E., Lubis, I., & Sastro, Y. (2023). Response of rice peat humic acid ameliorant saturated soil culture (SSC) within tidal swamps. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1133(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1133/1/012009>.
- Yusran, F. H., Mariana, Z. T., & Juhrian. (2023). View of The Phosphorus Availability Due to Various Ameliorants in a New Rice Field of Barito Kuala Regency South Kalimantan. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(7), 101–110. <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2023/v35i72869>.
- Zay, I. S., & Triatmodjo, B. (2023). Kajian Pendangkalan, Pencucian Tanah Sulfat Masam dan Normalisasi Saluran Utama DIR Belanti I. In *Tesis*.