

Pengaruh Aplikasi Fly Ash Terhadap Sifat Kimia Tanah, Kadar Hara Makro, Silika, Logam Berat Dalam Jaringan Tanaman, Pertumbuhan dan Hasil Padi Sawah

The Effect of Fly Ash Application on Soil Chemical Properties, Macro Nutrient Levels, Silica, Heavy Metals in Plant Tissues, Growth, and Yield of Rice

Ismon Lenin^{1,2)}, Hermansah^{4*)}, Agustian⁴⁾, Auzar Syarif⁵⁾, and Ai Dariah³⁾

¹Program Doktor Ilmu Pertanian, Pascasarjana Fakultas Pertanian, Universitas Andalas, Limau Manis Padang 25175 Indonesia

²Pusat Riset Horticultura, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Kawasan Sains dan Teknologi Soekarno, Jl. Raya Jakarta-Bogor KM 46, Cibinong, Bogor 16915, Jawa Barat, Indonesia

³Pusat Riset Tanaman Perkebunan, Organisasi Riset Pertanian dan Pangan, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Kawasan Sains dan Teknologi Soekarno, Jl. Raya Jakarta-Bogor KM 46, Cibinong, Bogor 16915, Jawa Barat, Indonesia

⁴Departemen Ilmu Tanah dan Sumber Daya Lahan Fakultas Pertanian, Universitas Andalas, Limau Manis Padang 25175 Indonesia

⁵Departemen Agronomi, Fakultas Pertanian, Universitas Andalas, Limau Manis Padang 25175 Indonesia

Artikel Info

Artikel Diterima : 15-12-2025

Artikel Direvisi : 04-01-2026

Artikel Disetujui : 17-01-2026

Kata Kunci : fly ash, hara makro, logam berat, padi sawah, silika

Keyword : fly ash, heavy metals, macronutrients, rice paddy, silica

*Corresponding author:

ismonlenin62@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.36355/jsa.v10i2.1908>

ABSTRAK

Fly ash berpotensi digunakan sebagai pembenah tanah dan sumber hara tanaman, karena bersifat basa (pH 8-12), kadar hara silika tinggi, mengandung hara makro dan mikro yang dibutuhkan tanam. Penelitian bertujuan untuk mengetahui pengaruh aplikasi fly ash terhadap kadar hara makro, silika dan logam berat pada tanah, tanaman, dan gabah serta hasil padi sawah. Penelitian dilaksanakan dari bulan Juni-Desember 2024. Penelitian disusun dalam Rancangan Acak Kelompok 9 ulangan dan 3 perlakuan (Tanpa fly ash, 5 ton fly ash+1 ton pupuk kandang/ha, dan 5 ton fly ash/ha). Variabel yang diamati yaitu: 1) sifat kimia tanah dan kandungan logam berat sebelum dan sesudah perlakuan, 2) kadar hara makro, silika dan logam berat dalam jaringan tanaman dan gabah, 3) pertumbuhan tanaman, komponen hasil, dan hasil/ha. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat kesuburan tanah tergolong rendah. Pemberian fly ash meningkatkan C-organik, P-total, P-tersedia, Si-tersedia dan menurunkan kadar logam berat. Aplikasi fly ash meningkatkan kadar Si tanaman dan menurunkan kadar logam berat dalam jaringan tanaman dan gabah, meningkatkan anakan produktif dan hasil. Hasil tertinggi (8 t GKP/ha) didapatkan pada perlakuan 5 ton fly ash + 1 ton pupuk kandang/ha.

ABSTRACT

Fly ash has the potential to be used as a soil conditioner and a source of plant nutrients because it is alkaline (pH 8-12), has a high silica content, and contains macro and micronutrients needed by plants. The research aims to determine the effect of fly ash application on the levels of macro-nutrients, silica, and heavy metals in soil, plants, and rice grains, as well as on the yield of paddy rice. The study was conducted from June to December 2024. The research was arranged in a Randomized Block Design with 9 replications and 3 treatments (No fly ash, 5 tons of fly ash + 1 ton of manure/ha, and 5 tons of fly ash/ha). The variables observed were: 1) soil chemical properties and heavy metal content before and after treatment, 2) levels of macro-nutrients, silica, and heavy metals in plant tissues and rice grains, 3) plant growth, yield components, and yield per hectare. The results showed that the soil fertility level was categorized as low. The application of fly ash increased organic C, total P, available P, available Si, and reduced heavy metal content. The application of fly ash increases the Si content in plants and reduces the heavy metal content in plant tissues and rice grains, increases productive tillers, and yield. The highest yield (8 t GKP/ha) was obtained with the treatment of 5 tons of fly ash + 1 ton of manure/ha.

Keywords: fly ash, heavy metals, macronutrients, rice paddy, silica

PENDAHULUAN

Abu Terbang (*fly ash*) dan abu dasar (*bottom ash*) yang sering disebut FABA adalah limbah yang dihasilkan oleh pembangkit listrik termal yang menggunakan bahan bakar batubara (Haris et al., 2021). Aktivitas pembakaran batubara ini menghasilkan sekitar 5% FABA yang terdiri dari 10-20% *bottom ash* dan 80-90% *fly ash* (Faoziah et al., 2022). Jumlah fly ash yang dihasilkan dari PLTU seluruh Indonesia tahun 2024 mencapai 6,0 juta ton (Ditjenminerba, 2024).

FABA telah dikeluarkan dari listing limbah B3 pada tahun 2021 melalui PP Nomor 22 Tahun 2021 (ESDM, 2021), sehingga diperbolehkan untuk digunakan di berbagai bidang termasuk di bidang pertanian. Namun demikian pemanfaatan Fly ash di bidang pertanian sebagai pembenah tanah baru mencapai 8 ribu ton (0,24%) dari total fly ash yang dihasilkan seluruh PLTU di Indonesia (PLN, 2025). Khusus untuk PLTU Ombilin, fly ash belum banyak dimanfaatkan sehingga tumpukan material ini memerlukan tempat yang luas untuk penampungan, sekaligus menjadi beban bagi PLTU dalam pengelolaanya.

Potensi fly ash yang sangat besar ini perlu dicarikan solusinya agar memberikan kemanfaatan yang luas, terutama dalam bidang pertanian baik sebagai sumber hara maupun sebagai pembenah tanah. Fly ash memiliki sifat fisikokimia yang hampir sama dengan tanah, dengan pH 8-12 (Damayanti, 2018) mengandung unsur hara makro Kalsium (Ca), Magnesium (Mg), Natrium (Na), Kalium (K), Nitrogen (N), dan Fosfor (P) dan unsur hara mikro Besi (Fe), Seng (Zn), Mangan (Mn), dan Tembaga (Cu) (Damayanti, 2018; Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara, 2021). Komposisi dan kandungan kimia fly ash PLTU Ombilin adalah: SiO₂ (60,68%), CaO (2,28%), MgO (2,46%), Na₂O (0,17%), K₂O (0,12%), P₂O₅ (0,05%) (PT. Surveyor Indonesia, 2014).

Aplikasi fly ash ke lahan pertanian, akan meningkatkan konsentrasi asam monosilikat. Sebagian Si terjerap pada tapak jerapan dan sebagian larut dalam larutan tanah (Chi et al., 2022). Asam monosilikat dapat melepaskan P-terfiksasi, mengubah P tidak larut menjadi P tersedia bagi tanaman dan mengurangi pelindian hara P sekitar 40-90 % (Jala, 2005; Matichenkov & Calvert, 2002; Prasetyo et al., 2019; Yukamgo & Yuwono, 2007) serta menurunkan toksisitas hara (Fe,

Mn, dan Al), meminimalkan stres biotik dan abiotik dan meningkatkan hasil padi (Rao & Susmitha, 2017). Aplikasi fly ash memberikan sumbangan hara esensial bagi tanaman seperti Ca, Mg, K, P, Fe, Cu, Zn, dan Mn serta meningkatkan ketersediaan Si (Gao et al., 2022). Silika sangat penting untuk pertumbuhan yang kuat dan ketahanan terhadap penyakit jamur pada padi (Gong et al., 2022), serta melawan patogen penyebab penyakit, baik melalui deposisi di berbagai bagian tanaman maupun melalui modulasi/induksi gen pertahanan tertentu (Sathe et al., 2021a). Padi dianggap sebagai akumulator Si dan cenderung aktif mengakumulasi Si ke jaringan dengan konsentrasi 5% atau lebih tinggi (Sugiyanta et al., 2018).

Pemanfaatan fly ash diharapkan dapat memperbaiki kualitas tanah dan meningkatkan produksi komoditas pertanian, sekaligus mengurangi penumpukan FABA pada lokasi penampungan hasil pembakaran. Untuk dapat dimanfaatkan di bidang pertanian, diperlukan hasil kajian yang dapat menjawab keraguan berbagai kalangan terhadap tingkat keamanan cemaran logam berat baik pada tanah, tanaman dan gabah serta pengaruhnya terhadap ketersediaan hara, pertumbuhan dan hasil tanaman.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh aplikasi fly ash terhadap perubahan sifat kimia tanah; kadar hara silika dan logam berat pada tanah, tanaman, dan gabah, serta pengaruhnya terhadap pertumbuhan dan hasil padi sawah.

BAHAN DAN METODE

Penelitian dilaksanakan di lahan sawah petani desa Talawi Hilir, Kecamatan Talawi, Kota Sawahlunto dari bulan Juni-Desember 2024. Lokasi penelitian berada dalam kawasan PTU Ombilin dengan jarak antara lokasi penelitian dan PLTU sekitar 500 m. Penelitian terdiri dari 3 perlakuan, yaitu : A) Tanpa fly ash, B) 5 ton Fly ash + 1 ton

pupuk kandang, dan C) 5 ton Fly Ash/ha. Penelitian disusun dalam Acak Kelompok dengan 9 ulangan. Varietas yang digunakan adalah varietas unggul lokal Gadang Rumpun, ditanam 3 batang/rumpun dengan jarak tanam 20 x 20 cm. Fly ash dan pupuk kandang diaplikasikan 2 minggu sebelum tanam. Tanaman diberi pupuk NPK dengan takaran 300 kg NPK (15:15:15)/ha dan Urea 200 kg/ha. Pupuk NPK diberikan seluruhnya saat tanam, sedangkan pupuk urea diberikan 3 kali pemberian masing-masing 1/3 dosis saat tanam berumur 10 HST, 1/3 dosis saat tanaman berumur 35 HST, dan sisanya 1/3 dosis lagi saat tanaman berumur 55 HST. Untuk mencegah serangan hama penggerek batang dilakukan penyemprotan dengan insektisida saat tanaman berumur 30 HST dan fungisida saat tanaman berumur 30 dan 60, dan 80 HST. Penyiangan dilakukan secara manual sebelum dilakukan pemupukan susulan, yaitu pada umur 30 dan 50 HST. Sampel tanah setelah aplikasi perlakuan diambil saat tanaman berumur 30 HST. Tanaman sampel sebanyak 5 rumpun/petak perlakuan diambil pada umur 55 HST. Sampel tanah dan tanaman dikeringkan dalam oven, digiling dan diayak untuk dianalisis di laboratorium.

Metoda analisis dan ekstrak yang digunakan disajikan dalam Tabel 1. Pelaksanaan analisis tanah dan pupuk di laboratorium berpedoman kepada petunjuk teknis analisis kimia tanah, tanaman, pupuk dan air yang dikeluarkan Balai Penelitian Tanah (Sulaeman et al., 2005).

Variabel yang diamati selama penelitian terdiri dari :

- a) Analisis kimia tanah sebelum dan sesudah aplikasi perlakuan, meliputi : pH, C-organik, N-total, P-total, P-tersedia, K-total, K-tersedia, kation dapat tukar (K-dd, Ca-dd, Mg-dd), Si-total, Si-tersedia, dan kapasitas tukar kation (KTK), kadar logam berat (Pb, Cd, As, dan Hg)

- b) Analisis kadar hara makro (N, P, K, Ca, dan Mg) serta kadar silika dalam jaringan tanaman.
- c) Analisis kadar logam berat (Pb, Cd, dan Hg) dalam jaringan tanaman dan gabah
- d) Pertumbuhan tanaman, komponen hasil dan hasil gabah kering panen (GKP)/ha

Tabel 1. Metoda analisis yang digunakan untuk menentukan kadar hara, sifat kimia tanah dan pembenah tanah di laboratorium.

No	Sifat kimia	Pengekstrak/Metoda
1.	pH H ₂ O	pH Meter
2.	C-organik	Walkley and Black
3.	N-total	Kjeldahl
4.	P-total	HCl 25 %
5.	K-total	HCl 25 %
6.	Si-total	Gravimetri
7.	Logam berat	HNO ₃ , microwave digest
8.	KTK tanah	Amonium Asetat pH 7,0 (AAS)
9.	Hara makro dan mikro tersedia	Morgan (Natrium asetat, pH 4,8)

Penyusunan sidik ragam dan pengujian perbedaan antar perlakuan dilakukan menurut cara yang dikemukakan oleh (Gomez & Gomez, 1983). Uji beda nyata pengaruh rata-rata antar perlakuan digunakan uji lanjut beda nyata terkecil (BNT) pada tingkat kepercayaan 99 dan 95 %.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Fly ash yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari limbah pembakaran batu bara dari PLTU Ombilin dengan karakteristik kimia disajikan dalam Tabel 2. Fly ash yang digunakan dalam penelitian ini bersifat alkali dengan pH 8,14 dan memiliki hampir semua elemen-elemen yang terkandung tanah kecuali karbon dan nitrogen organik. Aplikasi fly ash diharapkan memberikan sumbangan hara esensial bagi tanaman seperti Si, Ca, Mg, K, P, Fe, Cu, Zn, Mn, dan boron (B). Fly ash bersifat alkali dengan pH 8-12. Hasil yang sama juga didapatkan oleh beberapa peneliti sebelumnya dimana fly ash bersifat alkali dengan pH 8-12.mengandung silika antara 40 – 60 %,

carbon antara 10-15 % berupa *unborned carbon*, hara makro K, Ca & Mg. Kandungan Ca & Mg antara 5-10 %, serta mengandung unsur mikro berupa Cu, Zn, Mn, Co, dan B (Damayanti, 2018; Noviardi, 2012; Vijayan & Behera, 1999; Wardani et al., 2012). Kandungan silika yang tinggi berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber hara silika untuk pertanian (Basu et al., 2009; Noviardi, 2012; Puslitbangtekmikra, 2021).

Berdasarkan SNI 9387:2025, fly ash yang digunakan dalam penelitian ini tergolong Grade A sebagai pembenah tanah juga memenuhi syarat sebagai pupuk Silika. Namun demikian berdasarkan Permentan No. 261/KPTS/ SR.310/M/4/2019 memenuhi syarat hanya sebagai pembenah tanah organik ditinjau dari pH, kandungan hara, dan kandungan logam berat dan tidak memenuhi syarat ditinjau dari segi kandungan C-organik. Dengan demikian pemanfaatan fly ash akan memberikan pengaruh yang bersifat komplementer jika dikombinasikan dengan berbagai sumber bahan organik.

Tabel 2. Karakteristik kimia fly ash yang digunakan dalam penelitian dibandingkan dengan SNI 9387:2025 dan Pembenh Tanah Organik (Permentan No. 261/KPTS/ SR.310/M/4/2019)

No	Unsur	Satuan	Nilai	Pembenh Tanah Fly Ash		Pembenh tanah organik
				SNI 9387:2025 Grade A	SNI 9387:2025 Grade B	Permentan No. 261/KPTS/ SR.310/M/4/2019
1	pH	-	8,14 ^{*)}	6 -12	6 - 12	4 - 9
2	C	%	0,31 ^{*)}	dicantumkan	dicantumkan	Minimum 15 %
3	SiO ₂	%	60,68	≥ 20		
4	Al ₂ O ₃	%	19,49	Maks. 30	Maks. 30	
5	Fe ₂ O ₃	%	12,48	Maks. 20	Maks. 20	Mak.1,5
6	CaO	%	3,28			
7	MgO	%	2,46			
8	Kadar CaO + MgO Total	%	5,74	≥ 6	1 s.d. < 6	
9	K ₂ O	%	0,12 ^{*)}	dicantumkan	dicantumkan	dicantumkan
10	Na ₂ O	%	0,17	dicantumkan	dicantumkan	dicantumkan
11	P ₂ O ₅	%	0,023 ^{*)}	dicantumkan	dicantumkan	dicantumkan
12	Cu	mg/L	0,0053	dicantumkan	dicantumkan	dicantumkan
13	Zn	mg/L	0,0084	dicantumkan	dicantumkan	Maksimum 5000
	B	mg/L	9,3370	dicantumkan	dicantumkan	dicantumkan
14	Pb	mg/L	0,0264	Maks. 500	Maks. 500	Maks. 50
15	Cd	mg/L	0,0002	Maks. 100	Maks. 100	Maks. 2
16	Hg	mg/L	0,0001	Maks. 1	Maks. 1	Maks. 1
16	As	mg/L	0,1767	Maks. 25	Maks. 25	Maks. 10

Sumber : PT. Surveyor Indonesia & ^{*)} Lab BPTP Sumatera Barat

Karakteristik Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di lahan sawah kelompok tani Desa Talawi Hilir, kecamatan Talawi, Kota Sawahlunto. Lokasi ini berada pada kawasan radius 500 m dari PLTU Ombilin, yang diduga banyak pihak terkena limbah fly ash dari PLTU Ombilin akibat terbawa angin dan air irigasi (gambar 1). Hasil analisis dua sampel tanah yang diambil secara komposit pada arelah seluas 10 Ha (Tabel 1), menunjukkan bahwa tanah berekasi asam masam, kandungan carbon organik tergolong rendah, kandungan N-total tergolong tinggi, dengan nilai C/N tergolong sedang. Kandungan P-total tergolong rendah

dan K-total tergolong sedang, demikian juga P-tersedia sangat rendah dan kandungan basa dapat dipertukarkan (K-dd, Ca-dd, Mg-dd, dan Na-dd) tergolong sedang dan KTK tanah juga tergolong sedang. Kandungan Si tersedia dengan pengekstrak Na-OAc pH 4 tergolong rendah, yaitu 95,85 ppm. Batasan kritis unsur hara silika (SiO₂) untuk tanaman padi adalah 300 ppm (Sumida, 1992). Silika-tersedia (SiO₂) dengan kriteria sedang menggunakan ekstraktan H₂O; 0,01 M CaCl₂; NH₄OAc pH 4,8; Na-OAc pH 4 berturut-turut adalah 28, 36, 73, 79 dan 81 ppm (Amin et al., 2019)



Gambar 1. Lokasi penelitian penelusuran hara dan logam berat pada tanah, tanaman, gabah melalui aplikasi fly ash pada radius 500 m dari PLTU Ombilin.

Batasan kritis kebutuhan Si untuk jenis tanah dapat berbeda-beda. Untuk tanah sawah di Indonesia khususnya, belum ada batasan kritis Si. Menurut (Husnain et al., 2012). sampai saat ini penetapan batasan kritis Si tanah sawah di Indonesia masih mengacu kepada kriteria Sumida (1992). Kandungan silika fly ash PLTU Ombilin mencapai 60% SiO_2 (PT Suvey Indonesia, 2014). Aplikasi fly ash diharapkan dapat meningkatkan kandungan Si-tersedia untuk tanaman.

Kandungan logam berat Pb 12,35 ppm, Cd 0,2 ppm, As (2,55 ppm) dan Hg 7,65 ppb. Berdasarkan kriteria yang ditetapkan oleh (Pickering, 1986), (Alloway & Ayres, 1998) dan (Manikadan, 2005), kadar logam berat pada lokasi penelitian ini tergolong rendah. Berdasarkan hasil analisis tanah dapat diterangkan bahwa tingkat kesuburan tanah sawah sekitar PLTU ombilin tergolong rendah yang dicirikan dengan kandungan karbon

organik dan P total dan P-tersedia yang rendah, serta kekurangan hara silika. Kandungan logam berat tergolong rendah. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tidak ada kaitan antara lahan sawah dengan limbah fly ash yang dihasilkan PLTU Ombilin. Tidak ditemukan dampak negatif terhadap sifat kimia dan cemaran logam berat. Sebaliknya produktivitas lahan ini berpeluang ditingkatkann melalui pemberian bahan organik dan bahan yang mengandung silika tinggi seperti fly ash. **Pengaruh aplikasi fly ash terhadap sifat kimia tanah**

Hasil analisis tanah setelah diberi perlakuan pada saat tanaman berumur 30 HST disajikan dalam Tabel 2. Terjadi perbaikan kualitas tanah setelah diberi perlakuan fly ash. Carbon organik tanah meningkat dari rata-rata 1,88 % sebelum diberi perlakuan, meningkat

Tabel 1. Sifat kimia tanah sebelum diberi perlakuan fly ash

No	Sifat kimia tanah awal	Nilai		Rata-rata	Harkat ^{*)}
		Sampel 1	Sampel 2		
1	pH H ₂ O	6,02	5,70	5,86	Agak masam
2	pH KCl	5,08	5,09	5,09	Agak masam
3	C-organik (%)	2,03	1,72	1,88	Rendah
4	N-Total (%)	0,79	0,56	0,68	Tinggi
5	C/N	10,94	12,95	11,95	Sedang
6	P-total (mg/100 g)	13,80	13,17	13,49	Rendah
7	K-Total (mg/100 g)	36,69	31,09	33,89	Sedang
8	P-Olsen (ppm)	4,64	1,30	2,97	Sangat rendah
9	K-dd (cmol ⁽⁺⁾ /kg)	0,44	0,44	0,44	Sedang
10	Ca-dd (cmol ⁽⁺⁾ /kg)	12,46	4,72	8,59	Sedang
11	Mg-dd (cmol ⁽⁺⁾ /kg)	1,77	0,89	1,33	Sedang
12	Na-dd (cmol ⁽⁺⁾ /kg)	0,36	0,52	0,44	Sedang
13	Al-dd (cmol ⁽⁺⁾ /kg)	td	td	-	Sangat rendah
14	H-dd (cmol ⁽⁺⁾ /kg)	0,25	0,27	0,26	-
15	CTK (cmol ⁽⁺⁾ /kg)	21,73	16,95	19,34	Sedang
16	Silikat kasar (%)	0,79	0,76	0,78	-
17	Si-tersedia (ppm)	93,9	97,8	95,85	Rendah
18	Pb (ppm)	12,3	12,4	12,35	Rendah
19	Cd (ppm)	0,2	0,2	0,2	Rendah
20	As (ppm)	2,2	2,9	2,55	Rendah
21	Hg (ppb)	8,0	7,3	7,65	Rendah

*) Kriteria berdasarkan (Sulaeman et al., 2005)

berturut-turut menjadi 2,18 % dan 2,16 % setelah aplikasi fly ash. C-organik pada perlakuan tanpa fly ash juga meningkat, namun kadarnya lebih rendah dibanding perlakuan fly ash dan kombinasi fly ash dengan pupuk kandang. Peningkatan kandungan C-organik ini diduga berasal dari

hasil pelapukan jerami padi hasil pertanaman sebelumnya. Namun kandungan N-total cenderung menurun. Nitrogen dalam tanah merupakan unsur hara yang sangat mobil, sebagian hara N hilang dan tercuci keluar petakan sawah saat penggenangan dan pengolahan tanah (Niklah et al., 2019).

Tabel 2. Sifat kimia tanah setelah diberi perlakuan fly ash

No	Sifat kimia tanah setelah perlakuan	Perlakuan		
		A	B	C
1	pH H ₂ O	5,19	5,06	5,18
2	pH KCl	4,23	4,15	4,28
3	C-organik (%)	2,03	2,18	2,16
4	N-Total (%)	0,20	0,16	0,13
5	C/N	10,15	13,63	16,61
6	P-total (mg/100 g)	13,17	22,31	13,80
7	K-Total (mg/100 g)	31,09	39,69	22,27
8	P-Olsen (ppm)	33,03	46,84	40,99
9	K-dd (cmol ⁽⁺⁾ /kg)	92,14	94,71	60,04

10	Ca-dd (cmol ⁽⁺⁾ /kg)	0,69	1,56	3,41
11	Mg-dd (cmol ⁽⁺⁾ /kg)	0,22	0,34	1,28
15	KTK (cmol ⁽⁺⁾ /kg)	18,41	23,41	20,36
17	Si-tersedia (ppm)	111,41	240,00	127,46
18	Pb (ppm)	1,03	0,05	0,02
19	Cd (ppm)	td	td	td
20	As (ppm)	td	td	td
21	Hg (ppb)	td	td	td

Keterangan :

- A. Tanpa fly ash, tanpa pupuk kandang
- B. 5 ton fly ash + 1 ton pupuk kandang
- C. 5 ton fly ash/Ha

Aplikasi fly ash meningkatkan kandung P-total, P-tersedia, K-total dan K-tersedia, serta meningkatkan kandungan basa-dd dan KTK tanah, terutama pada perlakuan fly ash yang dikombinasikan dengan pupuk kandang. Hasil yang sama juga didapatkan (Idwar et al., 2025) dimana kombinasi fly ash dengan solid secara nyata meningkatkan pH tanah, kandungan P- tersedia, C-organik, N-total, KTK, dan K-total, serta menurunkan nilai Al-dd pada tanah Ultisol. Hasil penelitian (Ginting & Indriyati, 2024) juga mendapatkan bahwa aplikasi fly ash dengan pupuk kandang ayam dan pupuk kandang sapi meningkatkan secara nyata pH tanah, kejenuhan basa, C-organik, dan basa-basa dapat dipertukarkan.

Aplikasi fly ash meningkatkan P-tersedia dari 33,03 ppm menjadi 46,84 ppm pada perlakuan fly ash yang dikombinasikan dengan pupuk kandang dan 40.99 ppm pada perlakuan fly ash. Terjadinya peningkatan P-tersedia diduga erat kaitannya dengan peningkatan kadar silika dalam tanah yang dapat meningkatkan pelepasan P yang terikat melalui pelarutan dan pertukaran dengan ion silikat. Pemberian silikat dapat meningkatkan P tersedia bagi tanaman (Prasetyo et al., 2019). Elektronegatifitas SiO_4^- lebih besar dibandingkan PO_4^{3-} , sehingga SiO_4^{4-} dapat menggantikan PO_4^{3-} yang terfiksasi. Ion silikat dapat mengikat P sehingga pelindian P berkurang sekitar 40-90 % (Matichenkov & Calvert, 2002).

Pemberian 5 ton fly ash + 1 ton pupuk kandang/ha meningkatkan kandungan Si-tersedia sebesar 250,4 % dibanding tanah sebelum diberi perlakuan dan pemberian 5 ton fly ash/ha meningkatkan Si-tersedia sebesar 133 %. Batas optimal Si-tersedia dalam tanah berdasarkan pengekstrak NH_4OAc pH 4,8, dan Na-OAc pH 4 adalah 79 ppm dan 81 ppm SiO_2 (Amin et al., 2019), dan batas kritis silika pada tanah sawah 300 ppm (Sumida, 1992). Tingginya tingkat ketersediaan silika pada perlakuan fly ash yang dikombinasikan dengan pupuk kandang erat kaitannya dengan efek pelarutan dari bahan organik yang menghasilkan asam-asam organik yang mampu melarutkan Si dari fly ash. Hasil penelitian Klotzbücher et al., (2018) dalam (Bimasri et al., 2024) mendapatkan bahwa pemberian pupuk organik mampu meningkat ketersediaan silika dalam tanah sebesar sebanyak 290 ppm.

Kadar Pb menurun dari 12,35 ppm menjadi 0,02 ppm setelah aplikasi 5 ton fly ash/ha dan 0,05 ppm pada perlakuan 5 ton fly ash+1 ton pupuk kandang/ha serta menurunkan kadar Cd dan Hg sampai batas tidak terdeteksi. Hasil yang sama juga didapatkan oleh (Ginting & Indriyati, 2024) bahwa pemberian fly ash mampu menurunkan kadar ketersediaan Pb dan Cd yang lebih tinggi dibandingkan dengan pemberian kotoran ayam dan kotoran sapi. Hasil penelitian ini juga mendapatkan kadar logam berat Pb, Cd dan Hg berada jauh dibawah batas keamanan lingkungan tanah. Menurut

(Chi et al., 2022) batas kualitas lingkungan tanah di Cina untuk logam berat Cd tidak boleh melebihi 0,3 ppm.

Pengaruh aplikasi fly ash terhadap kadar hara makro dan silika jaringan tanaman

Aplikasi fly ash meningkatkan kadar hara nitrogen dalam jaringan tanaman. Berdasarkan batas kecukupan hara yang ditetapkan oleh (Bryson & Mills, 2014) seluruh perlakuan yang diuji, kadar nitrogen

dalam jaringan tanaman tergolong rendah, namun demikian terlihat kecenderungan pemberian fly ash meningkatkan kadar hara N dalam jaringan tanaman. Kadar nitrogen tertinggi didapatkan pada perlakuan fly ash dicampur pupuk kandang. Kadar hara fosfor, kalium dan magnesium untuk seluruh perlakuan yang diuji berada dalam batas cukup dan tanaman tidak mengalami defisiensi (Tabel 3).

Tabel 3. Pengaruh aplikasi fly ash terhadap kadar hara makro dalam jaringan tanaman padi sawah

Hara Makro dan Silika	Perlakuan			Batas kecukupan *)
	A	B	C	
Nitrogen (%)	0,86	1,01	0,88	2,8 – 3,6
Fosfor (%)	0,28	0,24	0,23	0,10-0,18
Kalium (%)	4,12	3,19	2,47	1,20-2,40
Kalsium (%)	1,12	0,77	0,69	0,15-0,30
Magnesium (%)	0,28	0,37	0,27	0,15-0,30
Silika (%)	8,57	16,78	16,49	10-18

*) kriteria: (Bryson & Mills, 2014)

Keterangan :

- A. Tanpa fly ash, tanpa pupuk kandang
- B. 5 ton fly ash + 1 ton pupuk kandang
- C. 5 ton fly ash/Ha

Tanpa perlakuan fly ash kadar silika tanaman hanya 8,57 %. Kombinasi 5 ton fly ash dengan 1 ton pupuk kandang/ha, meningkatkan kadar silika sebesar 96 % dan aplikasi 5 ton fly ash/ha meningkatkan kadar silika sebesar 92 %. Batas kritis kandungan silika dalam jerami padi 11%, jika kandungan Si di bawah 11% dapat menjadi faktor penentu rendahnya tingkat pertumbuhan tanaman (Setiko & Setiko, 2019). Berdasarkan kriteria tersebut maka perlakuan tanpa fly ash, tanaman padi mengalami defisiensi Si karena hanya mengandung Si sebesar 8,57%. Aplikasi fly ash dapat meningkatkan kandungan silika tanaman padi ke level cukup yaitu meningkat menjadi 16,78 % dan 16,49 % masing-masing pada

perlakuan 5 ton fly ash + 1 ton pupuk kandang/ha dan perlakuan 5 ton fly ash/ha.

Padi merupakan tanaman pengakumulasi silikon (Si) tertinggi dibanding komoditas tanaman pangan lainnya. Penambahan Si ke tanah sawah meningkatkan pertumbuhan padi (Etesami et al., 2022). Peningkatan kandungan Si pada perlakuan fly ash akan memberi dampak positif terhadap peningkatan kandungan Si pada dinding sel, sehingga meningkatkan ketahanan tanam terhadap kerebahan dan gangguan hama dan penyakit. Hasil penelitian (Etesami et al., 2022) mendapatkan bahwa asam silikat, Si (OH)₄, dari tanah diangkut ke *simplast* akar melalui aksi *Aquaporin*. Asam silikat kemudian berdifusi melintasi akar ke *endodermis*. Di *endodermis*, asam silikat

berdifusi ke *xilem* dan diangkut ke pucuk melalui aliran transpirasi. Di pucuk, asam silikat dilepaskan dari *xilem* oleh *Aquaporin* dan disimpan di dinding sel.

Pengaruh aplikasi fly ash terhadap kadar logam berat dalam jaringan tanaman.

Kadar logam berat untuk seluruh perlakuan yang diuji tergolong sangat rendah. Terlihat kecendrungan akumulasi logam berat Plumbum (Pb) berkurang dengan aplikasi fly ash. Kadar Cadmium (Cd) tidak terdeteksi, sedangkan kadar Air Raksa (Hg) terdeteksi sangat rendah hanya berkisar 0,01-0,08 ppb (Tabel 4). Penurunan kadar logam berat ini diduga erat kaitannya dengan peningkatan KTK tanah yang mampu mengikat logam berat pada tapak-tapak jerapan (*adsorption base*) pada koloid tanah, dan juga terikat secara organik dan beasosiasi dengan senyawa humus yang tidak terlarutkan. Keadaan ini tercermin dari meningkatnya kandungan karbon organik dan KTK tanah setelah aplikasi fly ash. Penyerapan dan akumulasi logam berat pada tumbuhan

bergantung pada karakteristik fisiologis tumbuhan dan komponen tanah, termasuk pH tanah, potensial redoks (Eh), kandungan bahan organik, kandungan liat, dan kapasitas tukar kation (KTK) tanah (Wan et al., 2024).

Salah satu keunggulan fly ash dibanding amelioran lainnya adalah kandungan silika yang tinggi. Selain menguatkan batang dan meningkatkan ketahanan terhadap hama dan penyakit hama silika juga berperan dalam menghambat penyerapan logam berat (Gong et al., 2022). Aplikasi fly ash meningkatkan kadar hara makro dan silika sampai batas memenuhi kecukupan hara (Tabel 3). Menurut (Wan et al., 2024) elemen mineral yang cukup dalam jaringan tanaman dapat mengurangi akumulasi dan toksisitas logam berat pada tanaman dengan mengurangi stres oksidatif, memulihkan integritas membran sel, meningkatkan fotosintesis, menyeimbangkan penyerapan nutrisi esensial, dan mengatur penyerapan, translokasi, distribusi, dan spesiasi logam berat dalam tanaman.

Tabel 4. Pengaruh aplikasi fly ash terhadap kadar logam berat dalam jaringan tanaman padi sawah

Logam Berat	Perlakuan		
	A	B	C
Plumbum (ppm)	5,6	4,2	4,2
Cadmium (ppm)	td	td	td
Air Raksa (ppb)	0,01	0,08	0,02

Keterangan :

- A. Tanpa fly ash, tanpa pupuk kandang
- B. 5 ton fly ash + 1 ton pupuk kandang
- C. 5 ton fly ash/Ha

Pengaruh penambahan fly ash dan pupuk kandang terhadap kadar hara silika dan logam berat dalam gabah.

Aplikasi 5 ton fly ash + 1 ton pupuk kandang meningkatkan kadar silika dalam gabah sebesar 17,18 % dan 42,56 % pada

aplikasi 5 ton fly ash/ha (Tabel 5). Pemberian fly ash tidak menyebabkan kadar logam berat bertambah dalam gabah, dimana kadar yang terdeteksi jauh di bawah batas yang diperbolehkan, bahkan logam Hg tidak ditemukan dalam gabah.

Tabel 5. Pengaruh aplikasi fly ash terhadap kadar logam berat dalam gabah

Silika & Logam Berat	Perlakuan		
	A	B	C
Silika (%)	5,24	6,14	7,47
Plumbum (ppm)	1,4	1,4	1,4
Cadmium (ppm)	0,1	0,1	0,3
Air Raksa (ppb)	td	td	td

Keterangan :

- A. Tanpa fly ash, tanpa pupuk kandang
- B. 5 ton fly ash + 1 ton pupuk kandang
- C. 5 ton fly ash/Ha

Tidak terlihat adanya perbedaan kadar logam berat dalam gabah jika dibandingkan dengan perlakuan tanpa fly ash. Hal ini menunjukkan bahwa aplikasi fly ash tidak menyebabkan adanya akumulasi logam berat yang akan menurunkan kualitas gabah baik ditinjau dari aspek kesehatan, maupun aspek ekologis. Hasil penelitian (Purnamasari et al., 2024) mendapatkan bahwa beras yang dihasilkan dari aplikasi fly ash dan bottom ash pada tanah gambut tidak mengandung Pb tetapi mengandung Cd (0.26 mg/kg) dimana kandungan Cd tersebut masih berada dalam batas maksimum yang diizinkan berdasarkan SNI 6128:2020 (0.4 mg/kg). Menurut (Gong et al., 2022) aplikasi Si mengurangi toksisitas dan akumulasi timbal (Pb) pada banyak tanaman, termasuk padi serta tidak mengubah lokalisasi Pb dalam akar. Serapan Si menekan ekspresi banyak gen yang mengkode protein yang berperan dalam penyerapan dan transportasi Pb. Akumulasi Si di tunas diperlukan untuk mengurangi penyerapan Pb pada padi dan pengaruh ini dicapai melalui penekanan gen yang diinduksi oleh Si yang mengkode protein yang terlibat dalam penyerapan dan/atau transportasi Pb. Selanjutnya hasil penelitian (Chi et al., 2022) mendapatkan bahwa fly ash berpotensi mengurangi akumulasi kadmium (Cd) dan arsenik (As) dalam gabah padi. Hasil uji lapangan selama empat musim tanam, didapatkan bahwa konsentrasi Cd, As, dan As

anorganik dalam butiran padi secara signifikan berkurang dengan aplikasi fly ash.

Pengaruh aplikasi fly ash terhadap pertumbuhan dan hasil padi sawah

Aplikasi fly meningkatkan pertumbuhan tanaman dan berpengaruh nyata terhadap peningkatan jumlah anakan 60 hst dan jumlah anakan produktif, tetapi tidak berpengaruh nyata terhadap tinggi tanaman umur 30 dan 60 hst. Pemberian fly ash juga nyata menurunkan persentase gabah hampa dari 6,57 % turun menjadi 4,14 % pada perlakuan fly ash dicampur pupuk kandang, dan berkurang lagi menjadi 3,43 % pada perlakuan fly ash. Hasil gabah kering panen tertinggi didapatkan pada perlakuan fly ash dicampur pupuk kandang (8,00 ton GKP/ha) (Tabel 6).

Aplikasi fly ash cenderung meningkatkan hasil, namun tidak berbeda nyata dengan perlakuan tanpa fly ash. Kandungan hara silika yang tinggi dari fly ash memberikan pengaruh positif terhadap pertumbuhan tanaman, meningkatkan jumlah anakan produktif dan gabah bernas dan mengurangi gabah hampa. Hasil yang sama juga didapatkan oleh (Sathe et al., 2021b) dimana aplikasi silika ke tanah meningkatkan bobot kering tajuk, jumlah anakan total, anakan produktif, dan hasil serta memberikan efek pencegahan terhadap banyak patogen sehingga memberikan ketahanan terhadap hawar daun dan hawar seludang pada padi.

Tabel 6. Pengaruh aplikasi fly ash terhadap tingkat pertumbuhan dan hasil padi sawah.

Variabel	Paket A	Paket B	Paket C	CV (%)
Tinggi tanaman 30 HST (cm)	54.00 A	54.89 A	58.00 A	8.34
Jumlah anakan 30 HST (batang)	33.78 A	33.44 A	25.78 B	18.81
Tinggi tanaman 60 HST (cm)	91.89 A	91.56 A	87.89 A	7.80
Jumlah anakan 60 HST (batang)	39.44 B	38.89 B	49.78 A	21.20
Tinggi tanaman saat panen (cm)	132.56 A	133.78 A	133.22 A	1.26
Jumlah anakan produktif (batang)	22.67 B	28.00 A	25.67 AB	15.51
Panjang malai (cm)	24.00 A	23.71 A	22.86 A	5.07
Jumlah gabah/malai (butir)	143.14 A	146.00 A	132.29 A	11.93
Persentase gabah hampa (%)	6.57 A	4.14 B	3.43 B	36.74
Hasil GKP (t/ha)	6.33 B	8.00 A	6.78 B	7.04

Angka dalam baris yang sama diikuti oleh huruf besar yang sama tidak berbedanya pada taraf 0,5 LSD

Keterangan :

- A. Tanpa fly ash, tanpa pupuk kandang
- B. 5 ton fly ash + 1 ton pupuk kandang
- C. 5 ton fly ash/Ha

Hasil penelitian (Purnamasari et al., 2024) mendapat bahwa aplikasi *steel slag*, *fly ash* dan *bottom ash* pada tanah gambut meningkatkan pertumbuhan tanaman padi dan hasil. Respon positif pertumbuhan dan produksi padi berhubungan dengan peningkatan pH tanah dan ketersediaan Si, Ca dan Mg yang berasal dari pembenah tanah (*steel slag*, *fly ash* dan *bottom ash*).

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Tingkat kesuburan lahan tergolong rendah, kekurangan hara silika dan kandungan logam berat (Pb, Cb, Asn dan Hg) tergolong sangat rendah. Tidak ditemukan akumulasi logam berat pada lahan sawah yang berdekatan dengan areal PLTU Ombilin. Aplikasi fly ash baik yang dikombinasikan dengan pupuk kandang maupun yang diaplikasikan secara terpisah meningkatkan kandungan carbon organik, P-tesedia, Ca-dd, Mg-dd, dan Si-tersedia. Hasil pengukuran dengan AAS kandungan logam berat Pb berkurang dari 1,03 ppm tanpa fly ash menjadi 0,05 ppm pada perlakuan 5 ton fly ash dan 0,02 ppm pada perlakuan 5 ton fly ash + 1 ton pupuk kandang. Sedangkan

kandungan logam berat Cd, As, sangat rendah dan Hg tidak terdeteksi. Defisiensi hara silika terjadi pada tanah yang tidak diberi fly ash. Aplikasi fly ash meningkatkan kecukupan hara silika untuk padi sawah, dan menurunkan kadar logam berat dalam jaringan tanaman dan gabah, meningkatkan jumlah anakan produktif dan mengurangi gabah hampa dan meningkatkan hasil. Hasil tertinggi (8,00 ton GKP/ha) didapatkan pada perlakuan kombinasi 5 ton fly ash/ha dengan 1 ton pupuk kandang/ha.

Saran

Diperlukan penelitian yang lebih mendalam tentang formulasi campuran fly ash dengan berbagai sumber bahan organik lokal untuk meningkatkan kualitas tanah dan efisiensi pemupukan pada padi sawah.

DAFTAR PUSTAKA

- Alloway, B. J., & Ayres, D. C. (1998). Chemical Principles of Environmental Pollution, B.J. Alloway and D.C. Ayres. *Water, Air, and Soil Pollution*, 102(1), 216–218.
<https://doi.org/10.1023/A:100498620909>

- Amin, M., Nugroho, B., Suwarno, ., & Tjahyandari Suryaningtyas, D. (2019). Respons Pemberian dan Penetapan Status Hara Si pada Tanaman Padi. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 24(1), 32–40.
<https://doi.org/10.18343/jipi.24.1.32>
- Basu, M., Pande, M., Bhadoria, P. B. S., & Mahapatra, S. C. (2009). Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review. *Progress in Natural Science*, 19(10), 1173–1186.
<https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.12.006>
- Bimasri, J., Murniati, M., Wartono, & Andri. (2024). Pemberian Biosilika Sekam Padi Pada Tanah Entisol Untuk Budidaya Tanaman Jagung. *RADIKULA : Jurnal Ilmu Pertanian*, 3(1), 1–8.
- Bryson, G. M., & Mills, H. A. (2014). *Analysis Handbook IV. A guide to plant nutrition and interpretation of plant analysis for agronomic and horticultural crops*. (G. M, B. Harry, & A. Mills (eds.); IV). Micro-Macro Publishing, Inc. 183 Paradise Blvd., Ste. 104 Athens, Georgia 30607 Tel. (706) 548-4557 Fax: (706) 548-4891.
- Chi, Y., Peng, L., Tam, N. F. yee, Lin, Q., Liang, H., Li, W. C., & Ye, Z. (2022). Effects of fly ash and steel slag on cadmium and arsenic accumulation in rice grains and soil health: A field study over four crop seasons in Guangdong, China. *Geoderma*, 419(August 2020), 115879.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115879>
- Damayanti, R. (2018). Abu batubara dan pemanfaatannya: Tinjauan teknis karakteristik secara kimia dan toksikologinya. *Jurnal Teknologi Mineral Dan Batubara*, 14(3), 213–231.
<https://doi.org/10.30556/jtmb.vol14.no3.2018.966>
- Ditjenminerba. (2024). *Laporan Kinerja Ditjen Minerba*.
- ESDM, S. P. (2021). Fly Ash dan Bottom Ash (FABA) Hasil Pembakaran Batubara Wajib Dikelola SP.078/HUMAS/PP/HMS.3/3/2021. *Esdm*, 1.
<https://www.esdm.go.id/en/media-center/news-archives/fly-ash-dan-bottom-ash-faba-hasil-pembakaran-batubara-wajib-dikelola>
- Etesami, H., Li, Z., Maathuis, F. J. M., & Cooke, J. (2022). The combined use of silicon and arbuscular mycorrhizas to mitigate salinity and drought stress in rice. *Environmental and Experimental Botany*, 201(June), 104955.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104955>
- Faoziah, N., Iskandar, & Djajakirana, G. (2022). PENGARUH PENAMBAHAN KOMPOS KOTORAN SAPI DAN FLY ASH-BOTTOM ASH DAN PERTUMBUHAN TOMAT The Effect of Cow Manure Compost and Fly Ash-Bottom Ash (FABA) Addition on the Chemical Properties of Sandy Soil and Tomato Growth. *Jurnal Ilmu Tanah Dan Lingkungan*, 24(April), 1–5.
- Gao, Z., Jiang, Y., Yin, C., Zheng, W., Nikolic, N., Nikolic, M., & Liang, Y. (2022). Silicon fertilization influences microbial assemblages in rice roots and decreases arsenic concentration in grain: A five-season in-situ remediation field study. *Journal of Hazardous Materials*, 423(PB), 127180.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127180>
- Ginting, I. F., & Indriyati, L. T. (2024). REMEDIASI TANAH TERCEMAR TIMBAL DAN KADMIUM MENGGUNAKAN FLY ASH DAN BAHAN ORGANIK. *Journal of Soil Science and Environment*, 26(2), 66–71.
- Gomez, K. A., & Gomez, A. A. (1983).

- Statistical Procedures for Agricultural Research* (K. Gomez & A. Gomez (eds.); 2nd ed.). A Willey-Interscience Publication.
- Gong, X., Yang, F., Pan, X., & Shao, J. (2022). Accumulation of silicon in shoots is required for reducing lead uptake in rice. *The Crop Journal*, xxxx, 15–17. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2022.09.014>
- Haris, M., Ansari, M. A., & AA., K. (2021). Supplementation of fly ash improves growth, yield, biochemical, and enzymatic antioxidant response of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Hortic. Environ. Biotechnol.*, 62(5), 715–724. <https://doi.org/10.1007/s13580-021-00351-0>.
- Husnain, H., Rochayati, S., & Adamy, I. (2012). Pengelolaan Hara Silika pada Tanah Pertanian di Indonesia. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pemupukan Dan Pemulihan Lahan Terdegradasi*, 12, 237–246. <https://balittanah.litbang.pertanian.go.id/index.php/publikasi-mainmenu-78/art/661-silika153>
- Idwar, Nelvia, Irfandri, Lubis, N., & Veronica, S. (2025). Analisis Sifat Kimia Ultisol Setelah Pemberian Kompos Solid dan Fly Ash Batubara. *Jurnal Ilmu Tanah Dan Lingkungan*, 27(1), 1–6. <https://doi.org/10.29244/jitl.27.1.1-6>
- Indonesia, P. S. (2014a). *Lapora Hasil Analisis Hopper Fly Ash Unit II, PT. PLN-Persero. Unit II Pembangkit Ombilin*.
- Indonesia, P. S. (2014b). *Laporan Hasil Aanalisis Hopper Fly Ash Unit II, PLTU Ombilin*. PLN Unit Pembangkit Ombilin.
- Jala, S. (2005). *Fly ash as an amendment agent for soil fertility. Ph.D. Thesis*. Deemed University, Patiala.
- Jones, Benton, J., Jones, J., Wolf, Mil, B., & Harry. (1991). *Plant Analysis Handbook A Practical Sampling, Preparation, Analysis, and Interpretation Guide*. Micro-Macro Publ. Co. Athens, Goergia.
- Manikadan, A. (2005). Heavy metal pollution in soil. *Mahatma Phule Krishi Vidyapeeth, Rahuri Division of Agril. Chemistry and Soil Science College of Agriculture, Pune-05 Course Title :ACSS 505 (0+1) Seminar Research Guide : Dr. R.N. Adsule Date: 2nd Dec 2005, 505*.
- Matichenkov, V. V., & Calvert, D. V. (2002). Silicon as a Beneficial Element for Sugarcane. *Journal American Society of Sugarcane Technologist*, 22, 21–30.
- Niklah, W. M., Madrini, I. A. G. B., & Wijaya, I. M. A. S. (2019). Keragaman Unsur Hara Nitrogen pada Lahan Sawah di Desa Maduran, Kecamatan Maduran, Kabupaten Lamongan Jawa Timur. *Jurnal Ilmiah Teknologi Pertanian Agrotechno*, 4(1), 16. <https://doi.org/10.24843/jitpa.2019.v04.i01.p03>
- Noviardi, R. (2012). LIMBAH BATUBARA SEBAGAI PEMBENAH TANAH DAN. *Riset Geologi Dan Pertambangan*, 22(2), 95–104.
- Pickering, W. F. (1986). METAL ION SPECIATION -- SOILS AND SEDIMENTS (A REVIEW). *Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam -- Printed in The Netherlands*, 1, 83–146.
- PLN, P. (2025). *Sepanjang 2024, 3,4 Juta Ton FABA dari PLN Dimanfaatkan Jadi Berbagai Bahan Pendukung Infrastruktur Masyarakat Press Release No. 026.PR/STH.01.05/II/2025*. <https://web.pln.co.id/cms/media/siaran-pers/2025/02>
- Prasetyo, T. B., Yasin, S., & Yeni, E. (2019). Pengaruh Pemberian Abu Batu Bara Sebagai Sumber Silika (Si) Bagi Pertumbuhan dan Produksi Tanaman Padi (*Oryza Sativa* L.). *Jurna Solum*, VII(1), 1–6.
- Purnamasari, L., Hartono, A., Sudadi, U., & Anggria, L. (2024). Pengaruh Steel Slag,

- Fly Ash dan Bottom Ash terhadap Pertumbuhan Tanaman Padi di Tanah Gambut. *Jurnal Ilmu Tanah Dan Lingkungan*, 26(1), 48–53. <https://doi.org/10.29244/jitl.26.1.48-53>
- Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara. (2021). Pemanfaatan Fly Ash-Bottom Ash (FABA) sebagai Pembenah Lahan. *Puslitbang Teknologi Mineral Dan Batubara Bandung, April*, 1–12.
- Puslitbangtekmikra. (2021). *Pemanfaatan Fly Ash-Bottom Ash (FABA) sebagai Pembenah Lahan*. <https://seminar.tekmira.esdm.go.id/index.php/download/category/3-road-to-ismct-2?download=9:materi-wulandari-tekmira>
- Rao, G. B., & Susmitha, P. (2017). *Silicon uptake , transportation and accumulation in Rice*. 6(6), 290–293.
- Sathe, A. P., Kumar, A., Mandlik, R., Raturi, G., Yadav, H., Kumar, N., Shivaraj, S. M., Jaswal, R., Kapoor, R., Gupta, S. K., Sharma, T. R., & Sonah, H. (2021a). Role of silicon in elevating resistance against sheath blight and blast diseases in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 166(May), 128–139. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.05.045>
- Sathe, A. P., Kumar, A., Mandlik, R., Raturi, G., Yadav, H., Kumar, N., Shivaraj, S. M., Jaswal, R., Kapoor, R., Gupta, S. K., Sharma, T. R., & Sonah, H. (2021b). Role of silicon in elevating resistance against sheath blight and blast diseases in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 166(March), 128–139. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.05.045>
- Setiko, P. H., & Setiko, M. M. R. (2019). Faktor pembatas dan kecukupan silika dalam tanaman padi sawah di tanah gambut. *J. Agro Tatanen*, 1(2), 36–40.
- Sugiyanta, Dharmika, I. M., & Siti Mulyani, D. D. (2018). Pemberian Pupuk Silika Cair untuk Meningkatkan Pertumbuhan, Hasil, dan Toleransi Kekeringan Padi Sawah. *Jurnal Agronomi Indonesia (Indonesian Journal of Agronomy)*, 46(2), 153. <https://doi.org/10.24831/jai.v46i2.21117>
- Sulaeman, Suparto, & Eviati. (2005). *Petunjuk Teknis Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Pupuk dan Air* (B. Prasetyo, D. Santoso, & L. Widowati (eds.); Edisi Pert). Balai Penelitian Tanah. Badanlitbang, Kementerian Pertanian.
- Sumida, H. (1992). Silicon supplying capacity of paddy soils and characteristics of silicon uptake by rice plants in cool regions in Japan. *Bull. Tohoku. Agric. Exp. Stn*, 85, 1–46.
- Vijayan, V., & Behera, S. N. (1999). Trace Element Analysis of Fly ash. *International Journal of PIXE*, 9, 417–422.
- Wan, Y., Liu, J., Zhuang, Z., Wang, Q., & Li, H. (2024). Heavy Metals in Agricultural Soils: Sources, Influencing Factors, and Remediation Strategies. *Toxics*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/toxics12010063>
- Wardani, E., Sutisna, M., & Dewi, A. (2012). Evaluasi Pemanfaatan Abu Terbang (Fly Ash) Batubara Sebagai Campuran Media Tanam Pada Tanaman Tomat (SolaWardhani, E., Sutisna, M., & Dewi, A. (2012). Evaluasi Pemanfaatan Abu Terbang (Fly Ash) Batubara Sebagai Campuran Media Tanam Pada Tanaman Tomat (Sol. *Jurnal Itenas Rekayasa*, 16(1), 218821.
- Yukamgo, E., & Yuwono, W. (2007). Peran Silikon Sebagai Unsur Bermanfaat Pada Tanaman Tebu. *Ilmu Tanah Dan Lingkungan*, 7(2), 103–116.