

Profil Kandungan Kimia dan Potensi Senyawa Aktif Limbah FABA untuk Pengembangan Pupuk Berkelanjutan

Wiwin Rewini Kunusa^{1*}, Suleman Duengo², Julhim S.Tangio¹, Erni Mohamad¹, Nurul Fadilla Harun¹, Humairah Amatullah Duengo², Nuur Arif Syaifudin³

¹Program Studi Pendidikan Kimia, Universitas Negeri Gorontalo

²Program Studi Kimia, Universitas Negeri Gorontalo

³Baiajan Kimia dan Lindakunaan. PLTU Anaarek. Gorontalo

ABSTRAK

Limbah *fly ash* dan *bottom ash* (FABA) dari pembakaran batu bara di pembangkit listrik tenaga uap berpotensi mencemari lingkungan, namun kandungan mineralnya memungkinkan pemanfaatan kembali sebagai bahan baku pupuk anorganik. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kandungan unsur logam utama pada pupuk berbasis limbah FABA dari PLTU Anggrek, Kabupaten Gorontalo Utara, untuk menilai potensinya sebagai sumber unsur hara. Analisis Ca dan Mg dilakukan dengan metode titrasi, sedangkan Al, Fe, P, dan K dianalisis menggunakan spektrofotometri UV-Vis dengan linearitas kurva kalibrasi yang baik ($r > 0,97$). Hasil menunjukkan bahwa kandungan K pada pupuk 1 dan pupuk 2 masing-masing sebesar 0,0189% dan 0,0140%. Konsentrasi Ca berkisar 16,8–21,6 mg/L dan Mg 7,29–10,21 mg/L. Kandungan Al terdeteksi pada rentang 3,68–4,44 ppm, sedangkan Fe dan P teridentifikasi dalam jumlah terukur. Keberadaan Ca, Mg, dan K sebagai unsur hara makro menunjukkan bahwa limbah FABA memiliki potensi sebagai bahan baku pupuk anorganik, sekaligus mendukung pengelolaan limbah industri berbasis prinsip keberlanjutan.

Kata Kunci: Limbah FABA; pupuk anorganik ; spektrofotometri UV-Vis; keberlanjutan

ABSTRACT

Fly ash and bottom ash (FABA) generated from coal combustion in steam power plants have the potential to cause environmental contamination; however, their mineral content enables their reutilization as raw materials for inorganic fertilizers. This study aimed to evaluate the major metal element content in FABA-based fertilizer produced from the Anggrek Steam Power Plant, North Gorontalo Regency, in order to assess its potential as a nutrient source. Ca and Mg were analyzed using titration methods, while Al, Fe, P, and K were determined by UV-Vis spectrophotometry with good calibration curve linearity ($r > 0.97$). The results showed that the K content in fertilizer samples 1 and 2 was 0.0189% and 0.0140%, respectively. Ca concentrations ranged from 16.8–21.6 mg/L and Mg from 7.29–10.21 mg/L. Al was detected within the range of 3.68–4.44 ppm, while Fe and P were identified in measurable amounts. The presence of Ca, Mg, and K as macronutrients indicates that FABA waste has potential as a raw material for inorganic fertilizer, while also supporting sustainable industrial waste management practices.

Keywords: FABA waste; inorganic fertilizer; UV-Vis spectrophotometry; sustainability

Received: 11-11-2025, Accepted: 15-01-2026, Online: 30-01-2026

PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga uap (PLTU) merupakan jenis Pembangkit listrik yang sering digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik di Indonesia. PLTU Anggrek merupakan salah satu PLTU yang berada di Provinsi Gorontalo yang dikelola anak Perusahaan PJB (Pembangkit Jawa Bali) yang memiliki kapasitas Pembangkit 2x25 MW dengan bahan bakar Batubara (Ismail *et al.*, 2023). PLTU merupakan pembangkit yang menggunakan siklus rankine dengan memanfaatkan energi kinetik dari uap untuk memutar turbin dan menghasilkan listrik. Batubara masih menjadi bahan bakar utama PLTU karena ketersediaannya yang melimpah, namun penggunaannya menimbulkan permasalahan

*Corresponding author:

rewinikunusa2014@gmail.com

serius pada emisi karbon dioksida yang berkontribusi terhadap peningkatan suhu global (Tampubolon & Dwiyantoro, 2023). PLTU Anggrek berkapasitas 2 X 25 MW yang beroperasi sejak 2019 di Provinsi Gorontalo merupakan salah satu pembangkit yang masih didominasi penggunaan batubara (Djabal *et al.*, 2023). Penggunaan batubara sebagai bahan bakar menghasilkan limbah padat berupa *Fly Ash dan Bottom Ash* (FABA). Seiring meningkatnya konsumsi listrik, jumlah FABA yang dihasilkan PLTU juga semakin bertambah. Abu hasil pembakaran batu bara yang dihasilkan oleh PLTU umumnya terbagi menjadi dua fraksi utama: *fly ash* (abu terbang) yang halus dan terbawa aliran gas, serta *bottom ash* (abu dasar) yang lebih kasar dan mengendap di dasar tungku. *Fly ash* bersifat sangat halus, kaya silika dan alumina, serta sering mengandung oksida alkali (termasuk K_2O) sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan konstruksi, adsorben, atau amelioran tanah. Ukuran partikel yang sangat halus memberikan luas permukaan spesifik tinggi, yang berkontribusi terhadap reaktivitas material (Silva *et al.*, 2023). Memiliki potensi untuk penyerapan CO_2 , sehingga membuka peluang kontribusi dalam mitigasi perubahan iklim (Moerkerken *et al.*, 2021). *Bottom ash* berukuran lebih kasar dan sering dipelajari sebagai substitusi agregat atau media reklamasi. Kombinasi keduanya (FABA) dipelajari untuk aplikasi konstruksi, pengolahan air, dan pertanian. Pemanfaatan ini harus memperhatikan kandungan logam berat dan potensi pelindihan (*leaching*) agar aman bagi lingkungan (Kuznia, 2024).

Berdasarkan studi literatur yang telah diuraikan bahwa pemanfaatan FABA telah banyak dikembangkan sebagai alternatif bahan konstruksi, geopolimer, stabilisasi tanah, dan bahkan sebagai amelioran untuk tanah tertentu. Berdasarkan Kepala Badan Standardisasi Nasional No.499/KEP/BSN/10/2025 tentang Penetapan SNI 9387;2025 *fly ash* atau *bottom ash* sebagai Pembena Tanah dan bahan Baku Pupuk untuk Pertanian. Dalam bidang pertanian, FABA mulai diteliti sebagai bahan amelioran tanah dan sumber unsur hara makro sekunder serta mikro, termasuk kalsium, magnesium, dan kalium. Aplikasi FABA pada dosis terbatas dilaporkan dapat meningkatkan pH tanah masam, memperbaiki struktur tanah, dan meningkatkan kapasitas menahan air. Namun demikian, pemanfaatan FABA di lahan pertanian masih memerlukan kehati-hatian karena potensi kandungan logam berat yang dapat terakumulasi di tanah maupun tanaman (Cengiz *et al.*, 2021). Selain itu, pemanfaatan tersebut membutuhkan data ilmiah yang jelas mengenai komposisi unsur yang terkandung dalam limbah.

Tanpa adanya karakterisasi yang akurat, penggunaan FABA berisiko menimbulkan dampak terhadap lingkungan ataupun tidak memberikan hasil yang optimal. Secara kimia, *fly ash* dan *bottom ash* mengandung berbagai oksida logam seperti silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), besi oksida (Fe_2O_3), kalsium oksida (CaO), magnesium oksida (MgO), serta oksida alkali seperti kalium oksida (K_2O). Kandungan unsur hara seperti kalium inilah yang membuka peluang pemanfaatan *fly ash* dan *bottom ash* dalam bidang pertanian sebagai bahan amelioran tanah atau sumber hara alternatif (Abdullah *et al.*, 2019).

Beberapa hasil penelitian telah melaporkan pemanfaatan FABA sebagai bahan pupuk berpotensi memberikan manfaat besar bagi masyarakat lokal. Pupuk adalah bahan yang digunakan untuk tempat tumbuhnya akar tanaman. Media ini dapat berupa tanah atau campuran bahan lain seperti pasir, sekam, arang, perlit, dan vermikulit yang memiliki kemampuan menyerap air, menahan udara, dan mendukung pertumbuhan akar tanaman. Namun, sebelum dapat dimanfaatkan secara aman dan efektif, perlu dilakukan analisis kandungan mineral utamanya, khususnya Ca dan Mg, yang menentukan kelayakan FABA sebagai bahan pupuk. Dalam bidang pertanian dan lingkungan, *fly ash* mulai dipelajari sebagai bahan pembena tanah (*soil amendment*) dan sumber unsur hara mikro. Kandungan kalium, kalsium, dan magnesium dalam *fly ash* berpotensi membantu meningkatkan kesuburan tanah, khususnya pada tanah masam atau tanah terdegradasi. Aplikasi *fly ash* pada dosis terkendali dilaporkan dapat meningkatkan pH tanah, kapasitas menahan air, serta ketersediaan unsur hara tertentu. Namun demikian, respon tanah dan tanaman terhadap *fly ash* sangat bergantung pada karakteristik awal tanah serta komposisi kimia *fly ash* itu sendiri. Oleh sebab itu, penggunaan *fly ash* di bidang pertanian memerlukan evaluasi menyeluruh sebelum aplikasi lapangan (Horvatinec *et al.*, 2024).

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kandungan unsur hara Ca, Mg, P, Fe dan K dari pupuk berbahan FABA dari PLTU Anggrek menggunakan metode titrimetri dan Spektrofotometer UV-Vis. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi suatu kontribusi berharga dalam penemuan kandungan senyawa aktif kimia dari limbah PLTU. Penelitian ini memiliki tujuan jangka pendek atau tujuan umum untuk melihat profil kandungan kimia dan aktivitas gugus aktif serta kandungan logam dari limbah FABA. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran ilmiah mengenai potensi pemanfaatan FABA bagi masyarakat Desa Ilangata, pemerintah daerah, dan pihak PLTU dalam pengembangan pemanfaatan limbah secara berkelanjutan salah satunya sebagai pupuk berbahan FABA .

METODE PENELITIAN

Tahap I Sampling Lokasi

Sampel diambil dari pupuk NPK FABA PLTU Anggrek Kabupaten Gorontalo Utara. Eksperimental dilaksanakan di Laboratorium Kimia Fakultas MIPA Universitas Negeri Gorontalo.

Tahap II Prosedur analisis Ca, Mg, K, Fe dan P

Destruksi Asam : Pupuk 1 dan Pupuk 2 sesuai prosedur SNI 8910:2021

Melakukan destruksi asam sampel pada lemari asam dengan sistem scrubber uap asam. Sampel yang telah diambil berdasarkan standar pengambilan contoh uji yang sesuai dan dihomogenkan, dengan 10 mL HNO₃ 1:1, selanjutnya campuran kemudian tutup dengan kaca arloji. Tahap berikut larutan sampel dipanaskan suhu 95°C ± 5°C selama 10 –15 menit, tanpa mendidih, kemudian dinginkan. Menambahkan 5 mL HNO₃ pekat, ditutup kembali dengan kaca arloji dan dipanaskan kembali contoh uji pada suhu 95°C ± 5°C selama 30 menit. Mengulangi pemanasan hingga larutan jernih dan/atau asap berwarna coklat hilang jika asap berwarna coklat dan larutan masih keruh, ditambahkan kembali 5 mL HNO₃ pekat. Menambahkan 2 mL air bebas mineral dan 3 mL H₂O₂ 30%, ditutup dengan kaca arloji dan panaskan kembali contoh uji pada suhu 95 °C ± 5 °C dan reaksi peroksida dimulai. Melakukan pemanasan secara hati-hati dan pastikan tidak berbusa ekksesif selama pemanasan. Menambahkan 10 mL HCl pekat ke dalam contoh uji dan dilanjutkan pemanasan hingga volume larutan contoh uji mencapai 5 mL kemudian didinginkan. Tahap akhir, menyaring larutan contoh uji dan tampung filtrat di dalam labu ukur 100 mL dan larutan contoh uji siap untuk dianalisis.

Pembuatan Larutan Induk Ca, Mg, P, Fe dan K

Menimbang ± 0,190 g kcl (yang telah dikeringkan pada suhu 110 °C), masukkan ke dalam labu ukur 1000,0 ml (0,190 g kcl ≈ 100 mg/L); Larutkan dengan air bebas mineral hingga tepat tanda tera, lalu homogenkan; Hitung kembali kadar sesungguhnya berdasarkan hasil penimbangan.

Pembuatan Larutan Baku

Pipet 10,0 mL larutan induk Ca, Mg, P, Fe dan K 100 mg K/L, masukkan ke dalam labu ukur 100,0 mL; Tambahkan larutan pengencer hingga tanda tera, lalu homogenkan.

Pembuatan dan Pengukuran Larutan Standar

Pembuatan larutan standar adalah dengan membuat deret standar yaitu 1 ppm, 2 ppm, 3 ppm, 4 ppm, 5 ppm. Deret standar ini dimasukkan ke dalam kuvet untuk menganalisis kurva baku. Diukur serapan dengan spektrofotometer ultraviolet pada λ sesuai pengukuran logam Ca, Mg, P, Fe dan K dengan menggunakan blanko aquades.

Penentuan Kadar Ca, Mg, P, Fe dan K pada Pupuk 1 dan Pupuk 2

Sampel diencerkan dengan perbandingan 2:1 di mana sampel hasil destruksi diambil sebanyak 10 mL dan ditetesi dengan 1 tetes pengompleks Ca, Mg, P, Fe dan K yang kemudian dimasukkan ke dalam kuvet. Sampel diukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada Panjang gelombang maksimum. Pembacaan absorbansi larutan sampel dibuat dalam tiga kali replikasi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Samplng Lokasi dan Pengambilan Sampel

Berdasarkan aturan Permen LHK No.6 Tahun 2021 FABA tidak menjadi limbah B3 melainkan terdaftar sebagai Limbah Non B3. Hasil survey lokasi terkait dengan jumlah limbah FABA yang dihasilkan rata-rata per hari sebanyak 78 ton, dengan fly ash sebanyak 72 ton dan bottom ash 6 ton, dengan rata-rata per bulan sebanyak 2.232 ton. Masa simpan limbah FABA selama 3 tahun dari hari dihasilkannya limbah, dengan kapasitas penyimpanan yang ada yaitu 52.000 ton. Dalam tujuan penelitian ini, masa percobaan pembuatan pupuk berbasis FABA dilakukan dengan komposisi fly ash : kotoran ayam : daun kering adalah 1 : 1 : 1/4, fly ash 65 kg, kotoran ayam 65 kg, daun kering 16 kg, dengan tambahan EM4 yang telah teraktivasi (EM4 + Molase + Air) sebanyak 15 Liter, kemudian ditutup dengan terpal selama 14 hari.

Hasil Analisis Kandungan Kadar Ca, Mg, P, Fe dan K pada Pupuk 1 dan Pupuk 2

Dalam tahapan analisis, disiapkan larutan induk untuk membuat larutan standar Ca, Mg, P, Fe dan K dengan variasi konsentrasi 1 ppm : 2 ppm : 3 ppm : 4 ppm : 5 ppm. Analisis spektrofotometer UV-Vis menggunakan serapan cahaya dan menggunakan pengompleks berfungsi untuk mengubah analit menjadi kompleks yang menyerap cahaya UV sehingga kadar Ca, Mg, P, Fe dan K dalam sampel dapat diukur secara kuantitatif. Penentuan kurva baku yang memperoleh nilai y untuk menghitung kadar Ca, Mg, P, Fe dan K pada sampel dan nilai R untuk mengukur seberapa baik model kurva dalam merepresentasikan data yang valid dan akurat ($R^2 > 0.95$ atau $R^2 = 1$) dari hubungan antara konsentrasi dan absorbansi untuk hasil analisis yang dapat dipercaya. Dalam analisis ini, nilai $R^2 \leq 1$ menunjukkan bahwa kurva baku memiliki linearitas valid untuk digunakan dalam penentuan kadar Ca, Mg, P, Fe dan K pada sampel. Nilai R yang diperoleh ± 0.9777 yang berarti 97% data menunjukkan kesesuaian yang baik dan terpercaya untuk digunakan menghitung kadar sampel. Hasil analisis total kadar Ca, Mg, P, Fe dan K menggunakan metode titrasi dan spektrofotometer UV-Vis ditunjukkan pada tabel 1.

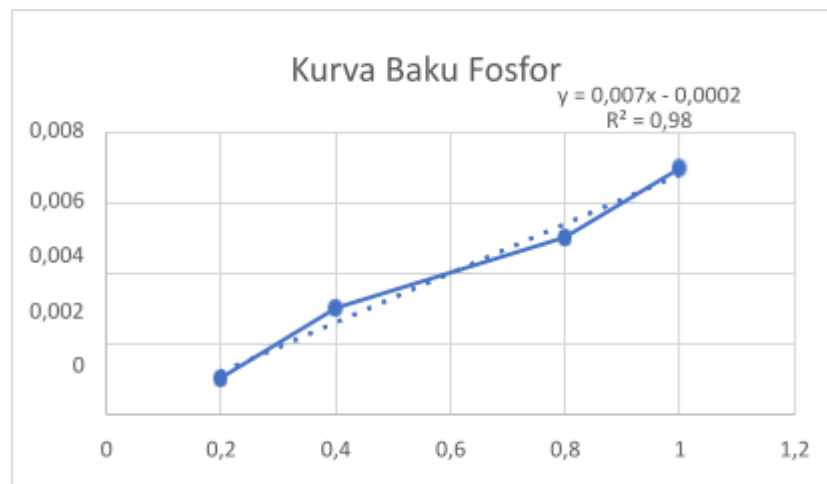
Tabel 1. Hasil Kadar K, Ca, P, Mg dan Al pada Pupuk Berbasis FABA

Sampel	K (mg/L)	Ca (mg/L)	P (mg/L)	Mg (mg/L)	Al (mg/L)	Fe (mg/L)
Pupuk 1	1,8905	16,80	0,0346	7,290	3,6817	0,0120
Pupuk 2	1,3976	21,60	0,0296	10,210	4,4378	0,0464

Berdasarkan data Tabel 1, kadar total Kalium menggunakan instrumen spektrofotometer UV-Vis pada (λ) 880 nm pada pupuk 1 dan 2 yang diperoleh 1,8905 (mg/L) dan 1,3976 (mg/L) belum memenuhi standar minimum SNI 2803-2012, yaitu minimal 6 - 8% untuk syarat mutu K dalam pupuk NPK. Berdasarkan hal ini, total K pupuk 1 dan 2 belum optimal sebagai sumber utama K bagi tanaman untuk mendukung pertumbuhannya (Naim, Mohamad, & Kilo, 2024). Kalium akan membantu tanaman dalam memperoleh kebutuhan air melalui stomata. Menurut (Worotitjan *et al.*, 2022), dekomposisi akan mengubah kalium organik kompleks menjadi kalium organik sederhana sehingga tanaman akan mudah menyerapnya. Kadar K yang rendah akan berpengaruh terhadap ketahanan tanaman terhadap penyakit dan hama. Hal tersebut disebabkan oleh kurangnya asupan air yang ada pada tanaman sehingga rentan terhadap kekeringan. Namun demikian, FABA tetap berpotensi memberikan kontribusi terhadap perbaikan sifat kimia tanah, seperti peningkatan pH tanah masam serta suplai unsur makro sekunder dan mikro dalam jumlah terbatas.

Kadar total Kalsium (Ca) dan Magnesium (Mg) menggunakan metode titrasi EDTA pada pupuk 1 dan 2 adalah 16,8 (mg/L) dan 21,6 (mg/L). Kadar total (Mg) adalah 1,8905 (mg/L) dan 1,3976 (mg/L) dilakukan dengan metode titrasi EDTA pada kondisi pH 12–13 dengan indikator murexide yang berfungsi sebagai indikator kompleksometri spesifik untuk Ca^{2+} pada kondisi pH tinggi. Pada kondisi pH tersebut Mg^{2+} mengendap sebagai $\text{Mg}(\text{OH})_2$ sehingga tidak ikut bereaksi dengan indikator. Murexide membentuk kompleks berwarna dengan Ca^{2+} dari merah ke ungu menandakan titik akhir titrasi ketika seluruh ion Ca^{2+} telah terikat oleh EDTA. Hal ini memungkinkan pengukuran Ca dilakukan secara lebih selektif tanpa terganggu oleh keberadaan Mg. Murexide merupakan indikator yang sensitif terhadap Ca dan bekerja optimal pada pH 12–13 karena lingkungan alkalis meminimalkan interferensi Mg^{2+} . Sedangkan Mg dihitung melalui selisih antara volume EDTA untuk kesadahan total dan volume EDTA untuk Ca, sesuai standar SNI. Variasi komposisi mineral Ca dan Mg pada fly ash dan bottom ash menunjukkan bahwa FABA mengandung mineral hara makro sekunder yang berpotensi meningkatkan kesuburan pupuk. Hal ini sejalan dengan beberapa penelitian yang menyatakan bahwa FABA memiliki CaO dan MgO cukup tinggi sehingga dapat menyuplai ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} bagi tanaman (Utami, 2018 dan Faoziah *et al.*, 2022).

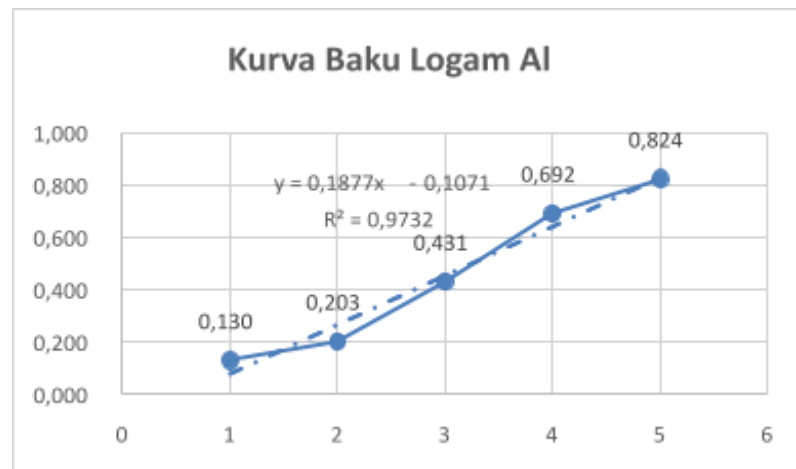
Berdasarkan data dalam tabel 1, kadar total fosfor (P) menggunakan instrumen Spektrofotometer UV-Vis pada (λ) 880 nm dengan pengompleks amonium metavanadat menunjukkan hasil pada pupuk 1 dan 2 adalah 0,0346 (mg/L) dan 0,0296 (mg/L). Dari data absorbansi larutan standar diperoleh persamaan regresi linier: $y = 0,007x - 0,0002$ dengan nilai regresi $R^2 = 0,9800$. Fosfor merupakan salah satu unsur hara makro esensial yang berfungsi untuk pertumbuhan akar, fotosintesis, pembentukan bunga dan buah, serta mempercepat pematangan tanaman. FABA PLTU Anggrek memiliki potensi sebagai pupuk, terutama sebagai bahan pembenah tanah karena kandungan mineralnya yang dapat memperbaiki sifat fisik tanah, meskipun nilai unsur hara makro fosfor hasilnya rendah. Secara keseluruhan, pupuk dari media FABA dapat berfungsi lebih pada pembenahan tanah, bukan sebagai penyedia unsur hara makro seperti fosfor.



Gambar 1. Kurva Baku Larutan Standar Fosfor

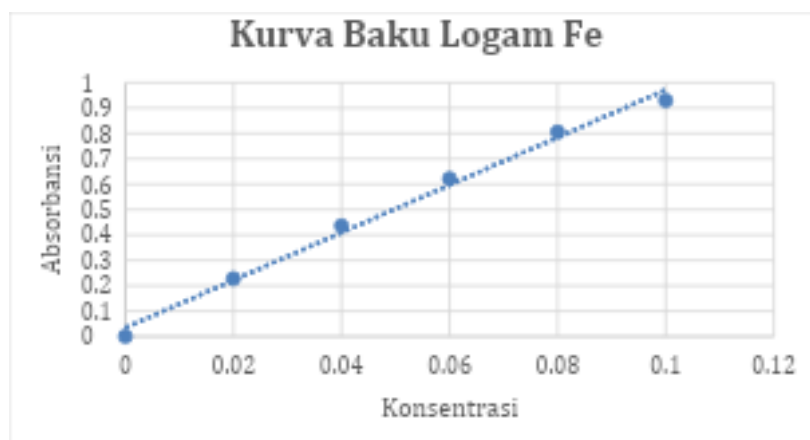
Berdasarkan data tabel 1, kadar total Aluminium (Al) menggunakan instrumen spektrofotometer UV-Vis pada (λ) 880 nm pada pupuk 1 dan 2 adalah 3,6817 (mg/L) dan 4,4378 (mg/L) menggunakan metode spektrofotometri UV-Vis berdasarkan pembacaan absorbansi kompleks berwarna yang terbentuk dari reaksi Al dengan reagen pembentuk kompleks spesifik. Data kalibrasi menunjukkan hubungan linear yang sangat kuat antara konsentrasi standar Al dan absorbansi hasil pengukuran, menghasilkan persamaan regresi $y = 0,154746x - 0,013731$ dengan nilai $R^2 = 0,9931$. Hasil kajian beberapa peneliti, bahwa aluminium menjadi toksik pada tanaman terutama pada kondisi tanah asam ($\text{pH} < 5,5$), karena pada pH rendah Al^{3+} menjadi lebih mudah larut dan lebih reaktif, sehingga menghambat

pemanjangan akar, merusak ujung meristem, dan menurunkan kemampuan tanaman menyerap nutrisi. Pada kondisi pH netral–basa Al cenderung berada dalam bentuk hidroksida dan tidak reaktif. Nilai 3–4 ppm pada hasil analisis ini menunjukkan potensi Al larut yang tidak tergolong tinggi,



Gambar 2. Kurva Kalibrasi Alumunium

Berdasarkan data pada tabel 1. Kadar Besi (Fe) pada pupuk (1) dan (2) menggunakan metode spektrofotometri UV–Vis dengan prinsip metode pembentukan kompleks Fe–SCN yang menghasilkan warna merah, konsentrasi Fe terlarut masing-masing 0,012 (mg/L) dan 0,0464 (mg/L). Rendahnya kadar Fe terlarut disebabkan oleh dominannya bentuk Fe dalam FABA yang berupa oksida besi (Fe_2O_3 dan Fe_3O_4) yang bersifat stabil dan sukar larut dan tidak sepenuhnya dapat bereaksi dengan ion tiosianat (SCN^-) untuk menghasilkan warna kompleks yang terukur. Meskipun demikian, kadar Fe yang sangat rendah dalam bentuk terlarut ini menunjukkan bahwa pupuk (1) dan (2) berbahan FABA aman dari risiko toksisitas Fe bagi tanaman. Untuk mengetahui potensi FABA sebagai sumber Fe secara keseluruhan, diperlukan analisis kandungan Fe total menggunakan instrumen dengan sensitivitas yang lebih tinggi seperti AAS, ICP–OES, dan XRF. Dalam pengukuran kadar Fe, dilakukan pengukuran larutan standar untuk pembuatan kurva baku yang dihasilkan memiliki Kurva baku yang diperoleh menunjukkan hubungan linear yang sangat kuat dengan persamaan regresi $y = 9.3757x + 0.0034$ serta nilai $R^2 = 0.9923$. Kurva baku Fe ditunjukkan pada Gambar 5 berikut ini :



Gambar 3. Kurva Baku Larutan Standar Fe

SIMPULAN

Analisis logam Al, Fe, Mg, Ca, dan P pada pupuk berbasis FABA menunjukkan bahwa kandungan logam-logam tersebut berada dalam rentang yang dapat mendukung pertumbuhan

tanaman. Kandungan kalsium (Ca) dan magnesium (Mg) di masing-masing sampel pupuk memberikan kontribusi positif terhadap keseimbangan nutrisi tanaman. Sementara itu, kandungan aluminium (Al), besi (Fe), dan fosfor (P) juga terdeteksi, meskipun pada konsentrasi yang lebih rendah. Hasil ini menunjukkan bahwa limbah FABA memiliki potensi untuk digunakan sebagai bahan dasar pupuk yang berkelanjutan, asalkan pengelolaannya dilakukan dengan benar untuk meminimalkan dampak lingkungan. Saran yakni Diversifikasi Penggunaan FABA bahwa penggunaan FABA tidak hanya terbatas pada pupuk, namun dapat dieksplorasi untuk aplikasi lain seperti pupuk atau bahan konstruksi yang lebih ramah lingkungan, dengan melakukan penelitian lebih lanjut mengenai potensi penggunaannya. Selanjutnya Peningkatan Konsentrasi Unsur Hara: Penelitian lebih lanjut dapat difokuskan pada optimasi kandungan unsur hara dalam pupuk berbasis FABA agar dapat memenuhi kebutuhan tanaman secara lebih efektif, terutama untuk tanaman dengan kebutuhan spesifik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada pihak PLTU Anggrek Kabupaten Gorut yang telah bekerja sama dan Tim Peneliti serta Mahasiswa yang telah membantu dalam proses penelitian baik ide atau bantuan finansial.

DAFTAR RUJUKAN

- Abdullah, M. H., Rashid, A. S. A., Anuar, U. H. M., Marto, A., & Abuelgasim, R. (2019). Bottom ash utilization: A review on engineering applications and environmental aspects. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 527(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/527/1/012006>
- Cengiz, C., Şahin, Ş., Cengiz, B., Başkır, M. B., & Dağlı, P. K. (2021). Evaluation of the visitor understanding of coastal geotourism and geoheritage potential based on sustainable regional development in western black sea region, Turkey. *Sustainability (Switzerland)*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/su132111812>
- Djabal, H., Djafar, R., Djamalu, Y., & Liputo, B. (2023). Simulasi Sistem Pltu Anggrek 2 X 25 Mw Menggunakan Software Cycle Tempo Dengan Variasi Beban Turbin 25%, 50%, 75% Dan 100%. *Journal Of Renewable Energy Engineering*, 1(1), 20–24. <https://doi.org/10.56190/jree.v1i1.8>
- Faoziah, N., Iskandar, & Djajakirana, G. (2022). Pengaruh Penambahan Kompos Kotoran Sapi dan FABA Terhadap Karakteristik Kimia pada Tanah Berpasir dan Pertumbuhan Tanaman Tomat. *Jurnal Ilmu Tanah Dan Lingkungan*, 24(1), 1–5. <https://doi.org/10.29244/jitl.24.1.1-5>
- Horvatinec, J., Buczny, J., & Ondrasek, G. (2024). Fly ash application impacts master physicochemical pedovvariables: A multilevel meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 368(July), 122066. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122066>
- Ismail, Z., Djafar, R., Djamalu, Y., & Liputo, B. (2023). Analisis Performa Sistem Pltu Anggrek Kapasitas 2X25 Mw Menggunakan Bahan Bakar Batubara Dengan Beban Turbin 100%. *Journal Of Renewable Energy Engineering*, 1(1), 16–19. <https://doi.org/10.56190/jree.v1i1.13>
- Kuźnia, M. (2024). A Review of Coal Fly Ash Utilization: Environmental, Energy, and Material Assessment. *Energies*, 18(1), 52. <https://doi.org/10.3390/en18010052>
- Moerkerken, A., Duijndam, S., Blasch, J., van Beukering, P., & Smit, A. (2021). Determinants of energy efficiency in the Dutch dairy sector: dilemmas for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126095. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126095>
- Naim, F., Mohamad, E., & Kilo, J. La. (2024). ANALISIS KANDUNGAN UNSUR NPK PADA PUPUK ORGANIK BERBASIS SACHA INCHI (Plukenetia Volubilis). *Dalton: Jurnal Pendidikan Kimia Dan Ilmu Kimia*, 7(3), 223–228. <https://doi.org/10.31602/dl.v7i3.16654>
- Silva, W. D. O., Morais, D. C., da Silva, K. G., & Carmona Marques, P. (2023). Exploring Influential Factors with Structural Equation Modeling–Artificial Neural Network to Involve Medicine Users in Home Medicine Waste Management and Preventing Pharmacopollution. *Sustainability (Switzerland)*, 15(14). <https://doi.org/10.3390/su151410898>

- Tampubolon, G. N., & Dwiyanoro, B. A. (2023). Studi Pengaruh Rasio Co-firing Bahan Bakar Batubara dan Biomassa Tertorefaksi Terhadap Performa Boiler. *Jurnal Teknik ITS*, 12(3). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v12i3.128337>
- Utami, S. W. (2018). KARAKTERISTIK KIMIAWI FLY ASH BATUBARA DAN POTENSI PEMANFAATANNYA SEBAGAI BAHAN PUPUK ORGANIK. *AGROINTEK*, 12(2), 108. <https://doi.org/10.21107/agrointek.v12i2.4048>
- Worotitjan, F. D., Pakasi, S. E., & Kumolontang, W. J. N. (2022). Composting Technology Made From Water Hyacinth Tondano Lake. *Jurnal Agroteknologi Terapan*, 3(1), 1–7.