

# STUDI PEMANFAATAN LIMBAH *FLY ASH* BATU BARA BERDASARKAN KAJIAN PARAMETER KIMIA

Nia Nurfitria<sup>1\*</sup>) dan Kuntum Febriyantiningrum<sup>2)</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Matematika, FMIPA, Universitas PGRI Ronggolawe

<sup>2</sup> Program Studi Biologi, FMIPA, Universitas PGRI Ronggolawe

\*Email korespondensi: nia.nurfitria@gmail.com

## ABSTRAK

Pemanfaatan limbah pembakaran batubara di Indonesia menjadi salah satu isu yang menarik untuk diselesaikan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji potensi pemanfaatan limbah pembakaran batubara berupa fly ash berdasarkan kajian parameter kimia yaitu kandungan unsur-unsur kimia yang menyusun komposisinya. Sampel yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah fly ash berasal dari PLTU X. Metode yang digunakan adalah karakterisasi limbah fly ash PLTU X menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF) kemudian mengkaji potensi berdasarkan hasilnya. Hasil karakterisasi XRF menunjukkan bahwa komposisi kimia limbah fly ash PLTU X tersusun dari  $\text{SiO}_2$  (42,83%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (13%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (21,86%),  $\text{CaO}$  (10,07%),  $\text{MgO}$  (5,55%),  $\text{TiO}_2$  (0,68%),  $\text{Na}_2\text{O}$  (0,09%),  $\text{K}_2\text{O}$  (0,63%),  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  (0,32%),  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0,15%),  $\text{SO}_3$  (4,49%), C (59,39%). Jumlah unsur Si dan Al, dan C lebih banyak dibandingkan jumlah unsur Ca dan Mg, sehingga fly ash PLTU X merupakan jenis golongan F. Hasil tersebut menunjukkan bahwa limbah fly ash PLTU X termasuk golongan F. Aplikasi yang potensial berdasarkan kandungan tersebut yaitu dalam sektor semen dan bahan bangunan, berupa bahan tambahan semen dan sebagai geopolimer. Sedangkan dalam bidang pertanian, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengetahui efektivitas dan keamanan pengaplikasiannya ke dalam tanaman..

**Kata Kunci:** Batubara, fly ash, parameter kimia, potensi

## ABSTRACT

Utilization of coal combustion waste in Indonesia is one of the interesting issues to be resolved. This study aims to examine the potential utilization of coal combustion waste in the form of fly ash based on a study of chemical parameters, which is the content of chemical elements that construct its composition. The sample used in this study was fly ash waste from PLTU X. The method that used was the characterization of PLTU X fly ash waste using X-Ray Fluorescence (XRF) and then assessing the potential based on the results. XRF characterization results show that the chemical composition of PLTU X fly ash waste was composed of  $\text{SiO}_2$  (42.83%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (13%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (21.86%),  $\text{CaO}$  (10.07%),  $\text{MgO}$  (5.55%),  $\text{TiO}_2$  (0.68%),  $\text{Na}_2\text{O}$  (0.09%),  $\text{K}_2\text{O}$  (0.63%),  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  (0.32%),  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0.15%),  $\text{SO}_3$  (4.49%), C (59.39%). The number of elements of the elements Si and Al, and C is more than the number of Ca and Mg elements, so that PLTU X fly ash is a type of group F. These results indicate that PLTU X fly ash waste is included in class F. Potential applications based on this content are in cement and building materials sector, in the form of cement additives and as geopolymers. Meanwhile in agriculture, further research is needed to determine the effectiveness and safety of its application in plants.

**Keywords:** Coal, fly ash, Chemical Parameter, Potential

## I. PENDAHULUAN

Beberapa kegiatan industri menggunakan batubara sebagai bahan bakar utamanya, seperti pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Pembakaran batubara di PLTU menghasilkan tenaga listrik dengan sisa pembakaran berupa limbah abu terbang [1][2]. Limbah abu terbang ini berupa fly ash dan dan bottom ash (FABA) dengan komposisi 75% adalah fly ash dan sisanya merupakan bottom ash [3]. Jumlah limbah FABA sekitar 5 % dari total batubara yang dibakar. Data dari Kementerian ESDM pada semester pertama tahun 2022, penggunaan batubara di Indonesia dalam industri manufaktur dan kelistrikan mencapai 103,84 ton. Oleh karena itu, diperkirakan jumlah limbah FABA yang dihasilkan adalah sekitar 5,19 ton. Sejak dikeluarkannya Peraturan Presiden No 22 Tahun 2021, pemerintah menetapkan FABA sebagai limbah non B3. Sehingga penghasil FABA tidak lagi harus mengurus pelaporan dan perizinan dalam pengelolaannya [1]. Salah satu yang mendasari adanya regulasi tersebut adalah fakta bahwa hingga tahun 2020 saat FABA masih ditetapkan sebagai limbah B3 dan pemanfaatannya membutuhkan perizinan dari KLHK, jumlah limbah fly ash yang dimanfaatkan di Indonesia sejumlah 10-12% dengan sejumlah 73% diolah di pulau jawa, dan sisanya di luar pulau jawa [4]. Akibatnya, PLTU akan mengalami pembengkakan biaya operasional sehingga secara tidak langsung akan meningkatkan tarif dasar listrik. Meskipun demikian, keputusan pemerintah ini dinilai terlambat dibandingkan dengan negara-negara lain yang sudah menetapkan FABA sebagai limbah non B3. Hal ini dikarenakan kemudahan peraturan hukum dalam mengelola limbah FABA akan

mendukung keberhasilan pengelolaannya yang jumlahnya mencapai jutaan ton setiap tahun di Indonesia. Karena jika desain hukum tidak tersusun dengan baik akan menimbulkan permasalahan hukum tanpa terselesaikan pengelolaan limbahnya.

Jumlah *fly ash* yang lebih banyak dibandingkan bottom ash membuat pemanfaatannya lebih banyak dikaji. Secara kimia, *fly ash* merupakan mineral aluminosilikat yang banyak mengandung unsur-unsur seperti Ca, K, dan Na, sehingga memiliki sifat alkalis (pH 8-12). Disamping itu *fly ash* juga mengandung sejumlah kecil unsur C dan N [5]. Unsur lain yang terkandung dalam jumlah sangat kecil yaitu: Boron (B), fosfor (P) dan unsur-unsur seperti Cu, Zn, Mn, Mo dan Se. Komposisi kimia penyusun *fly ash* dipengaruhi oleh jenis batu bara yang dibakar, cara penyimpanan, dan pengelolaannya. Batubara dapat dikategorikan dengan jenis lignit, sub-bituminous, bituminous, dan antrasit. Pembakaran batubara jenis antrasit dan bituminous menghasilkan limbah FABA kelas F dengan komposisi tertinggi yaitu SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan Karbon. Sedangkan untuk golongan lignit dan sub-bituminus dihasilkan limbah FABA kelas C dengan komposisi limbah mengandung CaO dan MgO yang lebih tinggi dibandingkan kelas F. Komposisi kimia yang berbeda ini akan membuat limbah FABA ini memiliki perbedaan dalam hal penanganan, pengelolaan, dan potensi pemanfaatannya. Oleh karena itu, sangat perlu dilakukan sebuah studi penelitian untuk mengkaji potensi pemanfaatan limbah *Fly ash* yang diperoleh dari salah satu Pembangkit Lisrik Tenaga Uap (PLTU) yang dimiliki oleh negara Indonesia. Studi potensi dan pemanfaatan limbah *fly ash* dapat didasarkan pada parameter kimia hasil karakterisasi limbah *fly ash* yang dihasilkan. Dengan demikian, akurasi penggunaan dan pemanfaatan limbah bisa maksimal dan tepat guna.

## II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi pendahuluan yang dilakukan dengan mengkaji literatur (*literature review*) dari penelitian-penelitian yang sudah ada dan digunakan sebagai penunjuk potensi penggunaan *fly ash* dalam berbagai bidang. Potensi *fly ash* dikaji berdasarkan parameter kimia hasil karakterisasi X-Ray Fluorescence (XRF), yaitu metode karakterisasi kimia yang digunakan untuk penentuan komposisi kimia dan konsentrasi unsur-unsur yang terdapat dalam *fly ash*. Penelitian ini dilakukan mulai Januari-Mei 2020, dengan beberapa tahapan, yaitu pengambilan sampel *fly ash* di salah satu PLTU di Indonesia yaitu PLTU X dan karakterisasi XRF nya, kemudian dilakukan studi literatur untuk pengkajian potensi pemanfaatannya.

## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakteristik Limbah Padat *Fly ash*

Proses pembakaran batu bara yang digunakan di PLTU X yaitu menggunakan teknologi pembakaran berupa batubara serbuk (*pulverized coal combustion/ PCC*) [6]. Proses pembuatan batu bara menjadi serbuk dilakukan pada mesin *coal pulverizer*. Serbuk batu bara yang dihasilkan kemudian diinjeksikan ke tungku dengan suhu 1300°-1700°C [1]. Proses ini menghasilkan energi dan menghasilkan abu yang berupa suspensi partikel yang bergerak bersama gas pembakaran. Partikel abu ini ada yang ditangkap oleh filter atau biasa disebut *fly ash*, dan ada yang mengendap pada dinding tungku pembakaran dan bercampur dengan hasil pembakaran batu bara yang lainnya atau biasa disebut *bottom ash*.

*Fly ash* memiliki tekstur serbuk halus dengan ukuran yang lebih kecil yaitu antara 0,5 µm – 300 µm dibandingkan dengan *bottom ash* yang lebih besar dan kasar dengan ukuran partikel >0,5 µm [1]. Komposisi kimia *fly ash* dan *bottom ash* akan tergantung dari jenis batubara yang dibakar. Pembakaran ini menghasilkan energi yang dibutuhkan oleh PLTU untuk melakukan kegiatan pembangkit listrik dan menghasilkan limbah berupa *fly ash* dan *bottom ash* sebesar sebesar 85% dari total limbah yang dihasilkan. Limbah *fly ash* ini pada dasarnya belum dimanfaatkan secara maksimal oleh pihak PLTU dan selanjutnya membutuhkan Upaya lebih lanjut supaya masalah limbah PLTU bisa teratasi dan bermanfaat.

Untuk mengetahui manfaat dan penggunaan limbah PLTU, khususnya *fly ash* perlu dilakukan studi atau telaah lebih dalam terkait karakteristik komposisi atau kandungan yang terdapat pada limbah *fly ash*. Karakteristik *fly ash* didapatkan dari hasil karakterisasi XRF yang berisi komposisi kimia dan jumlah konsentrasinya. Adapun hasil karakterisasi XRF *fly ash* dapat dilihat pada Tabel 1. Dari tabel tersebut (Tabel 1), *fly ash* dari PLTU X merupakan *fly ash* tipe F yang merupakan hasil pembakaran batu bara jenis antrasit dan bituminous. Hal ini dapat dilihat dari jumlah unsur Si dan Al, dan C lebih banyak dibandingkan jumlah unsur Ca dan Mg.

Tabel 1. Hasil XRF limbah *fly ash*

No.	Parameter Kimia	Jumlah (%)
1.	SiO <sub>2</sub>	42,83
2.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,00
3.	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,86
4.	CaO	10,07
5.	MgO	5,55
6.	TiO <sub>2</sub>	0,68
7.	Na <sub>2</sub> O	0,09
8.	K <sub>2</sub> O	0,63
9.	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,32
10.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,15
11.	SO <sub>3</sub>	4,49
12.	C	59,39

### Potensi *Fly ash* PLTU X dalam Sektor Semen dan Material Bangunan

Berdasarkan hasil analisis XRF, *fly ash* tersebut termasuk dalam golongan F. Golongan ini mempunyai sifat pozzolanic sehingga membutuhkan tambahan bahan lainnya untuk menjadikannya *cementious*. Beberapa bahan yang dibutuhkan antara lain *quick lime, hydrated, lime*. Oleh karena itu, potensi yang dimiliki oleh limbah *fly ash* PLTU X adalah sebagai bahan baku pembuatan semen, namun kurang bagus jika digunakan sebagai pengganti semen. Hal ini dikarenakan *fly ash* tipe F tidak mempunyai sigat *selfcementing* karena kadar CaO < 20%.

Potensi *fly ash* ini sebagai bahan baku pembuatan semen memiliki kegunaan untuk menggantikan bahan baku berupa pasir silika, sehingga jumlah limbah *fly ash* dapat dikurangi. Meskipun hanya menggantikan beberapa fungsi saja dalam semen, namun limbah *fly ash* ini akan meningkatkan beberapa sifat beton yang dihasilkan. Beberapa sifat yang akan berpengaruh dengan adanya penambahan limbah *fly ash* ke dalam semen adalah kuat tekan, dan kelenturan. Selain menggantikan beberapa fungsi dalam pembuatan semen, limbah *fly ash* juga digunakan dalam bidang pembangunan seperti dalam pembuatan beton, paving block, dan geopolimer.

Penelitian yang dilakukan oleh Sari dan Sundari, semen dengan penambahan limbah *fly ash* setelah 3 hari, 7 hari, 28 hari akan memiliki nilai kuat tekan 202 kg/m<sup>2</sup>, 260 kg/m<sup>2</sup>, 322 kg/m<sup>2</sup>. nilai ini meningkat lebih besar dibandingkan dengan kuat tekan semen tanpa tambahan *fly ash* yaitu 166 kg/m<sup>2</sup>, 224 kg/m<sup>2</sup>, 298 kg/m<sup>2</sup> untuk waktu pengujian 3, 7, dan 28 hari. Hasil uji tekan ini dapat menunjukkan bahwa limbah *fly ash* memenuhi standar kualitas yang disyaratkan sebagai bahan campuran dalam pembuatan semen *Portland Composite Cement* (PCC). Pembuatan berton yang dilakukan dalam penelitian oleh Umbroh dkk. [7], penambahan *fly ash* yang digunakan untuk bahan baku pembuatan beton menunjukkan peningkatan kuat tekan terbaik dengan penambahan sebesar 30%, jika dibandingkan dengan jumlah penambahan lainnya yaitu. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah penambahan juga akan menentukan kualitas pengaplikasian *fly ash* sebagai bahan campuran semen dalam pembuatan beton. Penelitian lainnya dalam penguunaan *fly ash* tipe F untuk pembuatan paving blok dapat meningkatkan kualitas dalam ketahanan aus dan daya serap air yang lebih bagus kualitasnya dibandingkan paving blok yang menggunakan 100 % semen [8].

Geopolimer adalah senyawa aluminosilikat anorganik yang dibuat dari bahan yang banyak mengandung silikon dan aluminium. Beberapa bahan yang dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan geopolimer seperti *fly ash*, abu sekam padi, dll [9]. Sehingga *fly ash* dari PLTU X dapat digunakan sebagai bahan baku dalam pembuatan geopolimer. Namun dalam pelaksanaannya, pembuatan geopolimer berbahan baku limbah *fly ash* PLTU X membutuhkan bahan lain seperti aktivator berupa natrium hidroksida, sehingga dapat dihasilkan geopolimer dengan kemampuan mengikat seperti halnya semen jenis PCC. Penelitian yang dilakukan oleh Sengkey dkk., 2022, paving blok yang dibuat dari geopolimer dengan rasio aktivator: *fly ash* adalah 0,4 dapat menghasilkan mutu D yaitu untuk taman dan sejenisnya. Dari beberapa kajian literatur yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa limbah *fly ash* PLTU X dapat diaplikasikan dalam sektor semen dan bahan bangunan. Hasil dan kualitas hasil aplikasi dapat diketahui dengan penelitian lanjutan.

### Potensi *Fly ash* PLTU X dalam Bidang Pertanian

Secara kimia, *fly ash* mengandung unsur Si dan Al sebagai penyusun utama dan Fe, Ca, Mg, Na dan K sebagai penyusun lainnya. Dalam hasil analisa XRF *fly ash* dari PLTU X didapatkan bahwa unsur lain selain Ca dan Si adalah Al, Fe, Mg, Ti, Na, Mn, K dan P. Meskipun berada dalam konsentrasi yang kecil, beberapa unsur

hara dalam limbah *fly ash* merupakan unsur esensial yang dibutuhkan oleh tanaman. Kandungan unsur tersebut menjadikan limbah *fly ash* memiliki potensi untuk diaplikasikan dalam bidang pertanian seperti digunakan sebagai bahan tambahan pupuk dan bahan pembenah tanah. Kandungan unsur hara makro dan mikro adalah salah satu faktor yang berpengaruh dalam penentuan suatu bahan agar dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan pupuk dan pembenah tanah [1][11].

Potensi yang dimiliki *fly ash* dalam pembuatan pupuk dan pembenah tanah belum dapat dioptimalkan dengan baik meskipun potensinya besar. Hal ini karena adanya kandungan logam berat di dalam *fly ash* yang dapat terakumulasi dan masuk ke dalam tanaman pasca proses pengaplikasian. Penelitian yang sudah ada menunjukkan bahwa pada penambahan secara langsung limbah *fly ash* ke tanah dapat meningkatkan pH tanah [12], kapasitas menahan air dan jumlah kation. Namun, disisi lain konsentrasi logam berat yang naik, dan nilai N-Total, C-Organik, serta P yang menurun juga harus dijadikan pertimbangan dalam penggunaan limbah *fly ash* ini sebagai pembenah tanah [13]. Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk meminimalisasi pengaruh logam berat terhadap tanah dan tanaman adalah melakukan *phytomining*. Teknik ini dilakukan dengan menanam tanaman hiperakumulator logam berat pada tanah yang telah dipalikasi limbah *fly ash* sebagai pembenahnya. Tanaman bunga matahari adalah salah satu tanaman yang dapat digunakan sebagai bioakumulator logam berat yang ada di dalam tanah. Tanaman ini dapat menyerap logam berat dalam tanah yang diaplikasikan *fly ash* sebagai pembenahnya. Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* pada pembenah tanah berpengaruh nyata terhadap konsentrasi Pb dalam tanaman bunga matahari, pada bagian daun, batang, dan bunga [13] [14].

Limbah *fly ash* juga dapat digunakan sebagai campuran bahan dalam pupuk organik, penambahan *fly ash* pada pupuk organik dapat meningkatkan pH pupuk [11], namun tidak mempengaruhi kandungan NPK nya secara signifikan. Untuk kandungan logam berat, logam As, Hg, Cd, dan Pb ditemukan dalam pupuk dengan penambahan limbah *fly ash* namun masih dibawah ambang batas yang telah ditentukan oleh pemerintah. Meskipun masih dibawah ambang batas yang diperbolehkan, penelitian lanjutan dibutuhkan untuk mengetahui pengaruh pupuk yang mengandung logam berat ini ketika diaplikasikan untuk tanaman [15].

Pada penelitian ini belum dilakukan karakterisasi logam berat dalam limbah *fly ash* PLTU X, sehingga diperlukan karakterisasi dan studi lanjutan untuk mengetahui apakah terdapat logam berat dalam limbah *fly ash* PLTU X dan bagaimana potensi bahayanya. Oleh karena itu, masih perlu penelitian lanjutan baik itu melalui studi literatur terkait contoh pengaplikasian limbah *fly ash* yang telah dilakukan di bidang pertanian sebagai gambaran awal dan penentuan langkah kedepan untuk pemanfaatan limbah *fly ash* PLTU X.

#### IV. KESIMPULAN

Hasil karakterisasi XRF limbah *Fly ash* dari PLTU X memiliki jenis golongan F dengan jumlah unsur Si dan Al, dan C yang lebih banyak dibandingkan jumlah unsur Ca dan Mg. Berdasarkan komposisi unsur kimia dalam limbah *fly ash* tersebut, maka potensi yang dimiliki yaitu sebagai bahan tambahan dalam sektor semen dan bangunan sebagai bahan tambahan semen dan geopolimer. Sedangkan dalam bidang pertanian, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengetahui efektivitas dan keamanan pengaplikasiannya ke dalam tanaman.

#### V. REFERENSI

- [1] F. Anggara, H. T. B. M. Petrus, D. A. A. Besari, H. Manurung, and F. Y. A. Saputra, "Tinjauan Pustaka Karakterisasi dan Potensi Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash (FABA)," *Bul. Sumber Daya Geol.*, vol. 16, no. 1, pp. 53–70, 2021.
- [2] E. Yunita and Fitriyanti, "Analisis Potensi Dan Karakteristik Limbah Padat Fly Ash Dan Bottom Ash Hasil Dari Pembakaran Batubara Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (Pltu) Pt. Semen Tonasa," *JFT. No.1*, vol. 4, no. 1, pp. 93–106, 2017.
- [3] M. Asof, S. Arita, L. Luthfia, W. Andalia, and M. Naswir, "Analisis karakteristik dan potensi logam pada limbah padat fly ash dan bottom ash di PLTU industri pupuk," *J. Tek. Kim.*, vol. 28, no. 1, pp. 44–50, 2022.
- [4] J. J. Ekaputri, M. Shahib, and A. Bari, "Perbandingan Regulasi Fly Ash sebagai Limbah B3 di Indonesia dan Beberapa Negara," *Media Komun. Tek. Sipil*, vol. 26, no. 2, pp. 150–162, 2020.
- [5] R. Damayanti, "Abu batubara dan pemanfaatannya: Tinjauan teknis karakteristik secara kimia dan toksikologinya," *J. Teknol. Miner. dan Batubara*, vol. 14, no. 3, pp. 213–231, 2018.
- [6] N. Y. I. RIADESSY, "Analisis Konsumsi Batubara Pada Pltu Tanjung Awar-Awar Unit 1 Dengan Menggunakan Metode Least Square," 2015.
- [7] A. H. Umboh, M. D. J. Sumajouw, and R. S. Windah, "Pengaruh pemanfaatan abu terbang (fly ash) dari PLTU II Sulawesi Utara sebagai substitusi parsial semen terhadap kuat tekan beton," *J. Sipil Statik*, vol. 2, no. 7, 2014.
- [8] A. I. Aldwin, H. Sutikno, and D. H. Antoni, "Optimasi Penggunaan Fly Ash dan Bottom Ash PLTU

- Suralaya dalam Pembuatan Paving Block Mutu Tinggi,” *J. Dimens. Pratama ...*, pp. 8–15, 2018.
- [9] H. Kasyanto, “Tinjauan Kuat Tekan Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash dengan Aktivator Sodium Hidroksida dan Sodium Silikat,” *Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, vol. 3, pp. 254–259, 2012.
- [10] N. Nurfitri and K. Febriyantiningrum, “STUDI POTENSI LIMBAH PETERNAKAN SAPI DI KABUPATEN TUBAN SEBAGAI BAHAN BAKU PEMBUATAN PUPUK ORGANIK,” *Pros. Konf. Nas. Mat. dan IPA Univ. PGRI Banyuwangi*, vol. 2, no. 1, pp. 301–308, 2022.
- [11] L. Khasanah and A. Budiono, “PENGARUH PENAMBAHAN FABA TERHADAP SIFAT FISIK DAN DERAJAT KEASAMAN (pH) KOMPOS,” *DISTILAT J. Teknol. Separasi*, vol. 8, no. 3, pp. 460–468, 2022.
- [12] N. Kurniawati and F. Priyadi, “Pengaruh Aplikasi Abu Terbang dan Pupuk Kotoran Sapi terhadap Populasi Mikroorganisme di Tanah Ultisol,” *Agriprima J. Appl. Agric. Sci.*, vol. 5, no. 1, pp. 41–49, 2021.
- [13] R. Noviard and T. P. Damanhuri, “Penyerapan logam timbal (Pb) pada tanaman bunga matahari (*Helianthus annuus* L.) dengan variasi penambahan kompos dan limbah batubara pada media tanah,” *Ecolab*, vol. 9, no. 2, pp. 60–71, 2015.
- [14] B. L. A. Nugroho and N. D. Lestari, “PENGARUH ABU TERBANG BATUBARA TERHADAP SIFAT KIMIA TANAH DAN SERAPAN TIMBAL (Pb) OLEH TANAMAN AKAR WANGI (*Vetiveria zizanioides* L.),” *J. Tanah dan Sumberd. Lahan*, vol. 8, no. 2, pp. 471–480, 2021, doi: 10.21776/ub.jtsl.2021.008.2.18.
- [15] S. W. Utami, “Karakteristik kimiawi fly ash batu bara dan potensi pemanfaatannya sebagai bahan pupuk organik,” *Agointek J. Teknol. Ind. Pertan.*, vol. 12, no. 2, pp. 108–112, 2018.