

# KARAKTERISTIK ABU LAYANG (FLY ASH) DARI PLTU TANJUNG SELOR DAN POTENSINYA SEBAGAI PREKURSOR MATERIAL ALUMINOSILIKAT

## *Characteristics of Fly Ash from PLTU Tanjung Selor and Its Potential as Raw Material for Aluminosilicate Materials*

NUR HAYATI<sup>1\*</sup>, FILDZAH 'ADANY<sup>2\*</sup>, CHRISTINE D. NUGRAENI<sup>3\*</sup>, IIF A. SYARIF<sup>4\*</sup> dan RISKAVIANA KURNIAWATI<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Kimia FMIPA Universitas Negeri Surabaya Jl. Ketintang Surabaya 60231, Jawa Timur, Indonesia

<sup>2</sup> Pusat Riset Kimia Maju, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), KST BJ Habibie, Tangerang Selatan, Banten, Indonesia

<sup>3</sup> Jurusan Teknologi Hasil Perikanan, Universitas Borneo Tarakan, Jalan Amal Lama No. 1, Tarakan, Indonesia

<sup>4</sup> Jurusan Teknik Sipil, Universitas Borneo Tarakan, Jalan Amal Lama No. 1, Tarakan, Indonesia

<sup>5</sup> Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Kebumihan dan Energi, Universitas Trisakti, Jakarta, Indonesia

Korespondensi e-mail : nur.hayati@unesa.ac.id

\*Kontributor Utama

---

### ABSTRAK

Sekitar 500 juta ton hasil samping pembakaran batubara diproduksi setiap tahun, dengan abu layang yang menyumbang sekitar 70% dari produk samping tersebut. Oleh karena itu, pemanfaatan abu layang menjadi sangat penting karena jika tidak diolah dan dimanfaatkan dengan benar dapat berdampak buruk pada lingkungan dan kesehatan manusia. Pemanfaatan abu layang sangat dipengaruhi oleh karakteristiknya yang berbeda-beda pada setiap sumbernya karena dipengaruhi oleh jenis batubara, kondisi pembakaran, dan pendinginan. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan karakterisasi dengan menggunakan XRF dan XRD pada abu layang yang berasal dari PLTU Tanjung Selor. Berdasarkan ASTM C618, abu layang PLTU Tanjung Selor merupakan abu layang Kelas F karena memiliki total kandungan  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  adalah 71,4% ( $> 70\%$ ) dan CaO sebesar 13,83% ( $< 15\%$ ). Hasil XRD juga menunjukkan bahwa abu layang ini didominasi oleh  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dan  $\text{SiO}_2$  dengan munculnya puncak  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (hematit) pada  $2\theta = 33,44; 35,57; 43,27^\circ$  (PDF 01-073-0603) dan  $\text{SiO}_2$  (kuarsa) pada  $2\theta = 20,81; 26,63; 50,14; 57,26; 68,34^\circ$  (PDF 01-085-0335). Karakteristik dari abu layang ini menunjukkan bahwa abu layang ini memiliki potensi sebagai prekursor untuk sintesis zeolit X dan P karena memiliki rasio  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  1,63. Selain itu, karena kandungan Si dan Al yang dominan abu layang ini juga berpotensi sebagai prekursor geopolimer, kandungan Fe yang dominan (27%) juga mampu meningkatkan kekuatan dari geopolimer.

Kata kunci: abu layang, Kelas F, ASTM C618, aluminosilikat.

### ABSTRACT

Around 500 million tonnes of coal combustion by-products are produced annually, with Fly Ash accounting for about 70% of the by-product. Therefore, using Fly Ash is crucial because if it is not processed and utilized correctly, it can harm the environment and human health. The use of Fly Ash is strongly influenced by its characteristics, which are different for each source because it depends on the type of coal, combustion, and cooling conditions. Therefore, characterization was carried out in this study using XRF and XRD on Fly Ash from Tanjung Selor PLTU. Based on ASTM C618, PLTU Fly Ash Tanjung Selor is class F Fly Ash because the

amount of  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  is 71,4% (>70%) and the amount of CaO is 13,83% (<15%). The XRD results also show that  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and  $\text{SiO}_2$  dominate the Fly Ash with the appearance of the peak of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (hematite) at  $2\theta = 33,44; 35,57; 43,27^\circ$  (PDF 01-073-0603) and  $\text{SiO}_2$  (quartz) at  $2\theta = 20,81; 26,63; 50,14; 57,26; 68,34^\circ$  (PDF 01-085-0335). The characteristics of this Fly Ash indicate that it has the potential as a precursor for the synthesis of zeolit X and P because it has a  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio of 1,63. In addition, due to the dominant Si and Al content, Fly Ash has the potential as a geopolymer precursor; the dominant Fe content (27%) can also increase the geopolymer's development strength.

Keywords: fly ash, Class F, ASTM C618, aluminosilicate.

## PENDAHULUAN

Peningkatan jumlah populasi di Indonesia memicu peningkatan kebutuhan energi listrik. Berdasarkan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) bahwa kebutuhan energi listrik di Indonesia mencapai 159,12 juta *barrel of oil equivalent* (BOE) pada tahun 2020 dan mengalami peningkatan sebesar 5,82% pada tahun 2021 yaitu sebesar 168,28 juta BOE. Dampak dari peningkatan kebutuhan listrik ini mendorong pemerintah untuk terus berupaya meningkatkan kapasitas listrik di Indonesia (ESDM, 2021).

Selama beberapa tahun terakhir, peningkatan kapasitas listrik di Indonesia terus terjadi. Pada tahun 2019, kapasitas pembangkit listrik di Indonesia sebesar 72.251 MW dan mengalami peningkatan pada tahun 2021, yaitu sebesar 73.341 MW. Upaya meningkatkan kapasitas listrik juga tercermin dalam target pemerintah untuk mencapai kapasitas pembangkit listrik sebesar 35 GW pada tahun 2024. Hal ini tentu juga memicu peningkatan jumlah pembangkit listrik. Namun, peningkatan jumlah pembangkit listrik ini perlu diperhatikan karena 47% pembangkit listrik di Indonesia masih menggunakan batubara sebagai bahan bakar (ESDM, 2021). Penggunaan batubara sebagai bahan bakar ini tentu berdampak pada peningkatan produksi pembentukan produk samping pembakaran batubara (*Coal Combustion Residuals/ CCR*).

Produk samping pembakaran batubara (CCR) terdiri atas abu layang, *bottom ash*, *boiler slag*, *flue-gas desulphurization residue*, dan *fluidized bed combustion ash*. Total produksi CCR di Indonesia mencapai 500 juta ton setiap tahun dengan kandungan terbesar dalam CCR adalah abu layang yang mencapai 70% (Koukouzas *dkk.*, 2006). Abu layang yang dihasilkan dari proses pembakaran batubara di Indonesia mencapai 15.027.100 ton pada

tahun 2019. Akan tetapi, pemanfaatan abu layang di Indonesia masih rendah yaitu 10-12% tiap tahun (Triwulan *dkk.*, 2017; Ekaputri dan Bari, 2020). Abu layang yang telah dimanfaatkan di Indonesia sebanyak 73% berasal dari pulau Jawa dan pemanfaatan dari pulau lain masih dibawah 30%. Oleh karena itu, sangat penting untuk mendorong pemanfaatan abu layang dari pembangkit listrik tenaga batubara di luar Jawa untuk mempromosikan pengelolaan produk sampingan ini secara berkelanjutan dan mitigasi potensi dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia (Olii *dkk.*, 2023).

Saat ini, sebagian besar abu layang dimanfaatkan dalam industri semen yaitu sebagai bahan campuran semen dan beton (Alterary dan Marei, 2021). Selain itu, abu layang dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan batu bata, balok dan bahan bangunan lainnya. Abu layang juga dimanfaatkan untuk meningkatkan kesuburan tanah dan sebagai *filler* dalam produksi aspal (Oliveira, Cunha dan Ruotolo, 2019; Ooi *dkk.*, 2019; Park, Hwang dan Bae, 2019; Yadav dan Devi, 2019; Czuma *dkk.*, 2020).

Dalam beberapa tahun terakhir terjadi peningkatan minat dalam penggunaan abu layang yaitu sebagai prekursor material aluminosilikat karena abu layang memiliki kandungan silika dan aluminium yang signifikan. Salah satu penggunaan abu layang sebagai prekursor aluminosilikat adalah untuk sintesis zeolit. Zeolit adalah tipe aluminosilikat yang banyak digunakan sebagai katalis, adsorben, dan penukar ion (Alzeer dan MacKenzie, 2018). Zeolit dapat disintesis dari prekursor komersial dan alam. Penggunaan prekursor dari alam seperti kaolin, abu sekam padi dan abu layang menarik perhatian karena biaya produksi menjadi lebih rendah. Secara umum, zeolit disintesis dengan metode

hidrotermal, akan tetapi metode ini menghasilkan limbah dan gas. Gas yang dihasilkan berupa karbon dioksida dan gas yang mengandung nitrogen. Oleh karena itu, saat ini terdapat pengembangan metode sintesis zeolit yang lebih ramah lingkungan seperti ionotermal, maupun dengan penggunaan *microwave* (Derbe, Temesgen dan Bitew, 2021).

Sintesis zeolit dari abu sekam padi menggunakan metode hidrotermal pada suhu 160°C selama 7 jam dilaporkan oleh Deviani, Mahatmanti dan Widiarti (2018). Hasil FTIR dan XRD menunjukkan bahwa zeolit hasil sintesis mempunyai struktur mirip zeolit Y yang terdiri dari campuran kristal faujasite, kabasite, dan cancrinite. Murukutti dan Jena (2022) melakukan sintesis zeolit dari abu layang India dengan metode alkali fusi yang dilanjutkan dengan metode hidrotermal. Hasil sintesis menunjukkan bahwa zeolit X terbentuk ketika rasio Si/Al lebih besar dari 1 atau pada rentang 1-2 dengan suhu hidrotermal sebesar 100°C selama 8 jam dan zeolit A berhasil disintesis dari abu layang ketika rasio Si/Al sebesar 1 dengan suhu hidrotermal 100°C selama 6 jam.

Studi terkait pemanfaatan abu layang selain sebagai material aluminosilikat ada juga yang digunakan sebagai prekursor geopolimer (Tigue dkk., 2018). Geopolimer dapat disintesis dengan mereaksikan antara abu layang dengan alkali. Geopolimer dapat dimanfaatkan sebagai pengganti semen. Selain itu, geopolimer juga dimanfaatkan dalam industri konstruksi, keramik, dan refraktori (Cong dan Cheng, 2021).

Selain digunakan sebagai prekursor zeolit dan geopolimer, abu layang juga dilaporkan dapat digunakan sebagai material aluminosilikat lain seperti mullit dan *cordierite* (Koshy dkk., 2021; Tabit dkk., 2021). Mullit adalah material refraktori yang digunakan dalam produksi keramik dan *cordierite* adalah material keramik yang digunakan sebagai katalis dan penyaring partikulat pada mesin diesel (Lima dkk., 2022).

Pemanfaatan abu layang ini sangat dipengaruhi oleh karakteristik dari abu layang yang digunakan. Karakteristik abu layang akan berbeda satu sama lain karena bergantung pada komposisi batubara yang digunakan,

proses pembakaran dan pendinginan (Wei dan Song, 2020). Karakteristik abu layang ini memiliki peran penting dalam menentukan reaktivitas dan kesesuaiannya sebagai bahan prekursor aluminosilikat. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) dan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui karakteristik abu layang dari PLTU Tanjung Selor, Kalimantan Utara, Indonesia berdasarkan *American Society for Testing Materials* (ASTM) C-618.

Hasil penelitian diharapkan dapat digunakan sebagai acuan untuk pemanfaatan dan mengetahui potensi abu layang dari Tanjung Selor sebagai prekursor sintesis material aluminosilikat. Selain itu, dengan mengetahui karakteristik abu layang dapat dilakukan *pre-treatment* yang tepat pada abu layang sebelum digunakan sebagai prekursor material aluminosilikat.

## METODE

Abu layang yang berasal dari PLTU Tanjung Selor dicuci dengan aquades dan dikeringkan pada suhu 100°C semalam. Selanjutnya, abu layang yang berasal dari PLTU Tanjung Selor dianalisis unsur kimianya menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) menggunakan Bruker S2 PUMA. Komposisi mineral dan kristalinitasnya ditentukan dengan *X-Ray Diffraction* (XRD) menggunakan Philips X'pert APD. Difraktometer yang digunakan adalah lampu Cu dengan monokromator grafit. Pengukuran dilakukan pada  $2\theta$  dengan rentang 5-90°.

Pengukuran kandungan air dan *Loss on Ignition* (LOI) dalam abu layang Tanjung Selor diukur berdasarkan metodologi ASTM D7348. Abu layang sebanyak  $1,0 \pm 0,5$  g beserta wadahnya ditimbang dengan neraca analitik dan dipanaskan dengan oven hingga suhu 110°C selama 1 jam. Selanjutnya, sampel dan wadah didinginkan di desikator dan ditimbang hingga beratnya stabil. Penurunan berat pada langkah ini dicatat sebagai kadar air pada abu layang. Selanjutnya, abu layang yang telah kering ditempatkan dalam tanur dan dipanaskan secara bertahap selama dua jam hingga mencapai suhu 950°C. Sampel yang telah dipanaskan kemudian didinginkan hingga suhu kamar dalam desikator dan ditimbang. Penurunan berat setelah proses pemanasan dengan tanur ini merupakan LOI.

Perhitungan kandungan air dan LOI ditunjukkan pada persamaan 1 dan 2 (Mohebbi, Rajabipour dan Scheetz, 2015).

$$\% \text{ Kandungan air} : \frac{(Y-Z)}{(Y-X)} \times 100 \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan :

Y = massa cawan porselen + abu layang (sebelum dipanaskan)

Z = massa cawan porselen + abu layang (setelah dipanaskan)

X = massa cawan porselen

$$\% \text{ LOI} : \frac{(B-C)}{(B-A)} \times 100 \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan :

Y = massa cawan porselen + abu layang (sebelum kalsinasi)

Z = massa cawan porselen + abu layang (setelah kalsinasi)

X = massa cawan porselen

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik abu layang pada penelitian ini berdasarkan ASTM C618. ASTM membagi abu layang menjadi dua kelas berdasarkan komposisi logam oksidanya, yaitu Kelas C dan Kelas F. Hal utama yang membedakan karakteristik abu layang Kelas C dan Kelas F adalah total komposisi total dari  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  serta komposisi CaO. Abu Layang Kelas C adalah abu layang yang memiliki komposisi total dari  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  kurang dari 70% serta CaO lebih dari 15%. Abu layang Kelas F merupakan abu layang yang memiliki komposisi total dari  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  lebih dari 70% serta kandungan CaO kurang dari 15% (Manoharan *dkk.*, 2010). Selain hal tersebut, komposisi  $\text{SO}_3$  (<5%), kandungan air (<3%), serta LOI (<6%) menjadi parameter dalam penentuan kelas berdasarkan ASTM C618.

Komposisi oksida logam pada abu layang Tanjung Selor dianalisis dengan XRF. Hasil analisis XRF dari abu layang pada penelitian ini (Tabel 1) menunjukkan bahwa urutan komposisi oksida logam dari yang terbesar adalah sebagai berikut  $\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO}$ . Oksida logam lain seperti  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ , MnO dan MgO juga ditemukan dalam jumlah yang sangat kecil (<7%).

Tabel 1. Komposisi oksida logam abu layang PLTU Tanjung Selor berdasarkan hasil analisis XRF

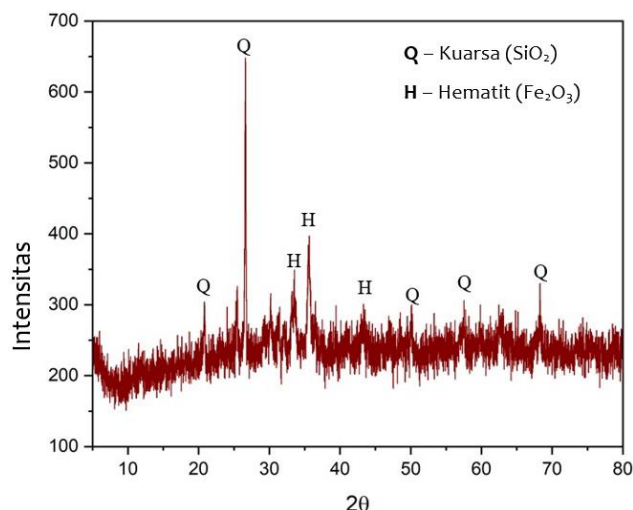
Logam Oksida	Konsentrasi (%)
$\text{SiO}_2$	27,31
CaO	13,83
$\text{Al}_2\text{O}_3$	16,77
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	27,32
MgO	6,21
$\text{SO}_3$	4,66
$\text{K}_2\text{O}$	1,04
$\text{TiO}_2$	0,94
MnO	0,59

Berdasarkan ASTM C618, abu layang PLTU Tanjung Selor merupakan abu layang Kelas F karena memiliki  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  sebesar 71,4% dan CaO sebesar 13,83% (Al-Shmaisani *dkk.*, 2022). Selain itu, Abu layang Kelas F merupakan abu layang yang berasal dari pembakaran batubara yang berjenis antrasit atau bitumen berdasarkan ASTM C618 (Kim *dkk.*, 2015). Karakteristik abu layang dari PLTU Tanjung Selor yang menunjukkan bahwa abu layang ini termasuk dalam Kelas F berdasarkan ASTM C618 ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik abu layang dari PLTU Tanjung Selor berdasarkan ASTM C618

Parameter	Kelas F (%)	Kelas C (%)	Penelitian (%)
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	> 70	> 50	71,4
CaO	< 15	> 15	13,83
$\text{SO}_3$	< 5	< 5	4,66
LOI	< 6	< 6	5,13
Kandungan air	< 3	< 3	0,38

Komposisi mineral dan kristalinitas dari abu layang PLTU Tanjung Selor juga dianalisis dengan XRD. Difraktogram abu layang ditunjukkan pada Gambar 1. Difraktogram pada Gambar 1 menunjukkan bahwa abu layang didominasi oleh kuarsa ( $\text{SiO}_2$ ) dan hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) yang ditunjukkan oleh puncak-puncak khas dari kedua mineral tersebut. Puncak dari mineral kuarsa ditunjukkan pada  $2\theta = 20,81; 26,63; 50,14; 57,26; 68,34$  (PDF 01-085-0335). Sementara puncak dari mineral hematit ditunjukkan pada  $2\theta = 33,44; 35,57; 43,27$  (PDF 01-073-0603). Difraktogram XRD ini didukung dengan hasil analisis XRF, yaitu  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  merupakan elemen paling



Gambar 1. Difraktogram abu layang PLTU Tanjung Selor

melimpah dalam abu layang PLTU Tanjung Selor. Total persentase  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sebesar 44,08%. Hasil ini menunjukkan bahwa abu layang ini memiliki potensi sebagai material aluminosilikat, seperti zeolit dan geopolimer (Sari dkk., 2018).

Abu layang pada penelitian ini memiliki rasio  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  sebesar 1,63. Hal ini menunjukkan bahwa abu layang memiliki potensi sebagai prekursor zeolit dengan kadar silika rendah yaitu zeolit dengan kadar Si/Al kurang dari 2. Zeolit yang memiliki rasio Si/Al rendah adalah zeolit A ( $\text{Si/Al} = 1,00$ ) dan X ( $\text{Si/Al} = 1,24$ ) (Auerbach, Carrado dan Dutta, 2003; Cardoso dkk., 2015; Iqbal dkk., 2019). Selain itu, dalam proses sintesis zeolit kandungan CaO harus diperhatikan. Kandungan CaO dalam abu layang dapat mengganggu proses pembentukan zeolit (Ojha, Pradhan dan Samanta, 2004); (Ren dkk., 2018). Hal ini karena kandungan CaO yang terlalu tinggi pada abu layang dapat mendorong terbentuknya fase pembawa Ca seperti kalsium silikat hidrat yang dapat mempengaruhi proses pembentukan zeolit serta mengurangi kemurnian dari zeolit yang dibentuk (Ameh dkk., 2017). Apabila dibandingkan dengan abu layang Kelas C, abu layang Kelas F memiliki potensi yang lebih tinggi jika diaplikasikan sebagai prekursor zeolit karena kandungan CaO yang lebih rendah. *Pre-treatment* yang dapat dilakukan untuk mengurangi kandungan Ca antara lain dengan cara mereaksikan abu layang dengan asam atau basa (Lu dkk., 2009; Qian dkk., 2018).

Komposisi  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  pada abu layang juga dapat mengganggu proses pembentukan zeolit. Oleh karena itu perlu dilakukan *pre-treatment* pada abu layang sebelum digunakan untuk prekursor zeolit (Herpi, Yunarti dan Saefumillah, 2021). *Pre-treatment* yang dilakukan untuk mengurangi kandungan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  pada abu layang antara lain dengan pemisahan menggunakan magnet ataupun dengan pelindian (Zhang dkk., 2019; Yadav dkk., 2023; Lu dkk., 2009; Qian dkk., 2018).

Kadar Si dan Al yang cukup besar pada abu layang juga berpotensi sebagai prekursor geopolimer (Wattimena, Antoni dan Hardjito, 2017). Abu layang Kelas F memiliki potensi yang lebih tinggi untuk digunakan sebagai bahan geopolimer dibandingkan dengan abu layang Kelas C. Hal ini disebabkan kandungan CaO yang lebih tinggi ( $>15\%$ ) pada abu layang Kelas F. Tingginya kadar CaO dapat mengganggu proses polimerasi yang berefek pada struktur mikro dan pengembangan kekuatan geopolimer (Gourley, 2003; van Deventer dkk., 2007), sehingga abu layang PLTU Tanjung Selor memiliki potensi sebagai prekursor geopolimer.

Berbeda dengan kandungan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  yang dapat mengganggu proses pembentukan zeolit. Kandungan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  pada abu layang mampu meningkatkan kekuatan mikrostruktur pada material geopolimer. Kandungan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  pada material memiliki keunggulan dalam mempengaruhi kuat tekan pada ketahanan suatu geopolimer. Kandungan besi memiliki

diameter yang lebih besar dibandingkan silika dan alumina, sehingga konsentrasi besi yang tinggi pada material mentah dapat memperpanjang reaksi geopolimer antara larutan basa dengan pengikat besi silika. Oleh karena itu, semakin lama proses pematangan geopolimer pada suhu ruang mampu meningkatkan kekuatan dari geopolimer. Komposisi besi oksida pada abu layang mampu meningkatkan karakteristik dari geopolimer (Zailani dkk., 2020; Ionescu dkk., 2022).

## KESIMPULAN DAN SARAN

Abu layang PLTU Tanjung Selor termasuk abu layang Kelas F berdasarkan ASTM C618. Hasil analisis XRF menunjukkan komposisi kimia pada abu layang Tanjung Selor terdiri dari 27,31% SiO<sub>2</sub>, 16,77% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 13,83% CaO, and 27,32% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Hasil ini mengonfirmasi hasil analisis XRD, pada abu layang PLTU Tanjung Selor terdapat mineral dominan yakni hematit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dan kuarsa (SiO<sub>2</sub>). Abu layang PLTU Tanjung Selor memiliki kandungan total SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sebesar 44,08% sehingga berpotensi digunakan sebagai prekursor dalam sintesis zeolit X dan P, serta material geopolimer.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PLTU Tanjung Selor atas sumbangsih material sebagai objek penelitian kami.

## DAFTAR PUSTAKA

- Al-Shmaisani, S., Kalina, R.D., Douglas Ferron, R. dan Juenger, M.C.G. (2022) "Assessment of blended coal source fly ashes and blended fly ashes," *Construction and Building Materials*, 342, hal. 127918. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127918>.
- Alterary, S.S. dan Marei, N.H. (2021) "Fly ash properties, characterization, and applications: A review," *Journal of King Saud University - Science*, 33(6), hal. 101536. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101536>.
- Alzeer, M.I.M. dan MacKenzie, K.J.D. (2018) "Synthesis and catalytic properties of new sustainable aluminosilicate heterogeneous catalysts derived from fly ash," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(4), hal. 5273–5282. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b04923>.
- Ameh, A.E., Fatoba, O.O., Musyoka, N.M. dan Petrik, L.F. (2017) "Influence of aluminium source on the crystal structure and framework coordination of Al and Si in fly ash-based zeolite NaA," *Powder Technology*, 306, hal. 17–25. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.11.003>.
- Auerbach, S.M., Carrado, K.A. dan Dutta, P.K. (2003) *Handbook of zeolite science and technology*. 1st Editio. Diedit oleh S.M. Auerbach, K.A. Carrado, dan P.K. Dutta. New York: CRC Press. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1201/9780203911167>.
- Cardoso, A.M., Paprocki, A., Ferret, L.S., Azevedo, C.M.N. dan Pires, M. (2015) "Synthesis of zeolite Na-P1 under mild conditions using Brazilian coal fly ash and its application in wastewater treatment," *Fuel*, 139, hal. 59–67. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.08.016>.
- Cong, P. dan Cheng, Y. (2021) "Advances in geopolymer materials: A comprehensive review," *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(3), hal. 283–314. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004>.
- Czuma, N., Zarębska, K., Motak, M., Gálvez, M.E. dan Da Costa, P. (2020) "Ni/zeolite X derived from fly ash as catalysts for CO<sub>2</sub> methanation," *Fuel*, 267, hal. 117139. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117139>.
- Derbe, T., Temesgen, S. dan Bitew, M. (2021) "A Short Review on Synthesis, Characterization, and Applications of Zeolites," *Advances in Materials Science and Engineering*. Diedit oleh M. Fedel, 2021, hal. 6637898. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1155/2021/6637898>.
- van Deventer, J.S.J., Provis, J.L., Duxson, P. dan Lukey, G.C. (2007) "Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products," *Journal of Hazardous Materials*, 139(3), hal. 506–513. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.044>.
- Deviani, S., Mahatmanti, F.W. dan Widiarti, N. (2018) "Sintesis dan karakterisasi zeolit dari abu sekam padi menggunakan metode hidrotermal," *Indonesian Journal of Chemical Science*, 7(1 SE-Articles). Tersedia pada: <https://doi.org/10.15294/ijcs.v7i1.20437>.

- Ekaputri, J.J. dan Bari, M.S. Al (2020) "Perbandingan regulasi fly ash sebagai limbah B3 di Indonesia dan beberapa negara," *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 26(2), hal. 150–162. Tersedia pada: <https://doi.org/10.14710/mkts.v26i2.30762>.
- ESDM (2021) *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia*. Ministry of Energy and Mineral Resources of Republic of Indonesia.
- Gourley, J.T. (2003) "Geopolymers; Opportunities for environmentally friendly construction materials," in *Adaptive Materials for a Modern Society*. Sydney: Institute of Materials Engineering Australasia.
- Herpi, A., Yunarti, R. dan Saefumillah, A. (2021) "Synthesized zeolite from coal fly ash: Effect of furnace and acidic pretreatment on the characteristic," in Saefurrohman, M. Muhammad, dan H. Nurdyanto (ed.) *Proceedings of The 6th Asia-Pacific Education And Science Conference, AECon 2020, 19-20 December 2020, Purwokerto, Indonesia*. Purwokerto: European Alliance for Innovation. Tersedia pada: <https://doi.org/10.4108/eai.19-12-2020.2309115>.
- Ionescu, B.A., Chira, M., Vermeșan, H., Hegyi, A., Lăzărescu, A.-V., Thalmaier, G., Neamțu, B.V., Gabor, T. dan Sur, I.M. (2022) "Influence of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO and molarity of NaOH solution on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers," *Materials*, 15(19), hal. 6965. Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/ma15196965>.
- Iqbal, A., Sattar, H., Haider, R. dan Munir, S. (2019) "Synthesis and characterization of pure phase zeolite 4A from coal fly ash," *Journal of Cleaner Production*, 219, hal. 258–267. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.066>.
- Kim, H., Kim, J.Y., Kim, J.S. dan Jin, H.C. (2015) "Physicochemical and optical properties of combustion-generated particles from a coal-fired power plant, automobiles, ship engines, and charcoal kilns," *Fuel*, 161, hal. 120–128. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.08.035>.
- Koshy, P., Ho, N., Zhong, V., Schreck, L., Koszo, S.A., Severin, E.J. dan Sorrell, C.C. (2021) "Fly ash utilisation in mullite fabrication: Development of novel percolated mullite," *Minerals*, 11(1), hal. 84. Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/min11010084>.
- Koukoulzas, N.K., Zeng, R., Perdikatsis, V., Xu, W. dan Kakaras, E.K. (2006) "Mineralogy and geochemistry of Greek and Chinese coal fly ash," *Fuel*, 85(16), hal. 2301–2309. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.02.019>.
- Lima, L.K.S., Silva, K.R., Menezes, R.R., Santana, L.N.L. dan Lira, H.L. (2022) "Microstructural characteristics, properties, synthesis and applications of mullite: a review," *Cerâmica*, 68(385), hal. 126–142. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1590/0366-69132022683853184>.
- Lu, S.G., Chen, Y.Y., Shan, H.D. dan Bai, S.Q. (2009) "Mineralogy and heavy metal leachability of magnetic fractions separated from some Chinese coal fly ashes," *Journal of Hazardous Materials*, 169(1–3), hal. 246–255. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.078>.
- Manoharan, V., Yunusa, I.A.M., Loganathan, P., Lawrie, R., Skilbeck, C.G., Burchett, M.D., Murray, B.R. dan Eamus, D. (2010) "Assessments of Class F fly ashes for amelioration of soil acidity and their influence on growth and uptake of Mo and Se by canola," *Fuel*, 89(11), hal. 3498–3504. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.06.028>.
- Mohebbi, M., Rajabipour, F. dan Scheetz, B.E. (2015) "Reliability of Loss on Ignition (LOI) test for determining the unburned carbon content in fly ash," in *World of Coal Ash*. Nashville.
- Murukutti, M.K. dan Jena, H. (2022) "Synthesis of nano-crystalline zeolite-A and zeolite-X from Indian coal fly ash, its characterization and performance evaluation for the removal of Cs<sup>+</sup> and Sr<sup>2+</sup> from simulated nuclear waste," *Journal of Hazardous Materials*, 423, hal. 127085. Tersedia pada: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127085>.
- Ojha, K., Pradhan, N.C. dan Samanta, A.N. (2004) "Zeolite from fly ash: synthesis and characterization," *Bulletin of Materials Science*, 27(6), hal. 555–564. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1007/BF02707285>.
- Olii, M.R., Wahab, A.A., Ichsan, I., Djau, R.A. dan Nento, S. (2023) "Beton hijau menggunakan fly ash sebagai substitusi parsial semen," *Siklus: Jurnal Teknik Sipil*, 9(1).
- Oliveira, J.A., Cunha, F.A. dan Ruotolo, L.A.M. (2019) "Synthesis of zeolite from sugarcane bagasse fly ash and its application as a low-cost adsorbent to remove heavy metals," *Journal of Cleaner Production*, 229, hal. 956–963. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.069>.

- Ooi, X.Y., Gao, W., Ong, H.C., Lee, H.V., Juan, J.C., Chen, W.H. dan Lee, K.T. (2019) "Overview on catalytic deoxygenation for biofuel synthesis using metal oxide supported catalysts," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, hal. 834–852. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.031>.
- Park, J., Hwang, Y. dan Bae, S. (2019) "Nitrate reduction on surface of Pd/Sn catalysts supported by coal fly ash-derived zeolites," *Journal of Hazardous Materials*, 374, hal. 309–318. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.051>.
- Qian, B., Hosseini, T., Zhang, X., Liu, Y., Wang, H. dan Zhang, L. (2018) "Coal waste to two-dimensional materials: fabrication of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanosheets and MgO nanosheets from brown coal fly ash," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(12), hal. 15982–15987. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03952>.
- Ren, X., Xiao, L., Qu, R., Liu, S., Ye, D., Song, H., Wu, W., Zheng, C., Wu, X. dan Gao, X. (2018) "Synthesis and characterization of a single phase zeolite A using coal fly ash," *RSC Advances*, 8(73), hal. 42200–42209. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1039/C8RA09215J>.
- Sari, D.K., Setyaningsih, E.P., Fansuri, H. dan Susanto, T.E. (2018) "Kajian karakteristik kimia dan fisika abu layang yang menjadi penentu kekuatan mekanik perekat geopolimer berbahan dasar abu layang," *Akta Kimia Indonesia*, 3(2), hal. 222–235. Tersedia pada: <https://doi.org/10.12962/j25493736.v3i2.4563>.
- Tabit, K., Hajjou, H., Waqif, M. dan Saâdi, L. (2021) "Cordierite-based ceramics from coal fly ash for thermal and electrical insulations," *Silicon*, 13(2), hal. 327–334. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00428-y>.
- Tigue, A.A.S., Dungca, J.R., Hinode, H., Kurniawan, W. dan Promentilla, M.A.B. (2018) "Synthesis of a one-part geopolimer system for soil stabilizer using fly ash and volcanic ash," in A.C. Kumoro, Hadiyanto, S.A. Roces, L. Yung, X. Rong, A.W. Lothongkum, M.T. Phong, M.A. Hussain, W.R.W. Daud, dan P.T.S. Nam (ed.) *MATEC Web of Conferences: The 24th Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE 2017)*. Semarang: EDP Sciences, hal. 05017. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815605017>.
- Triwulan, Priadana, K.A., Ekaputri, J.J. dan Bayuaji, R. (2017) "Physical and chemical character of fly ash of coal fired power plant in Java," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, hal. 012003. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/267/1/012003>.
- Wattimena, O.K., Antoni dan Hardjito, D. (2017) "A review on the effect of fly ash characteristics and their variations on the synthesis of fly ash based geopolimer," in *AIP Conference Proceedings: Green Construction and Engineering Education (GCEE)*. AIP Publishing, hal. 020041. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1063/1.5003524>.
- Wei, Q. dan Song, W. (2020) "Mineralogical and chemical characteristics of coal ashes from two high-sulfur coal-fired power plants in Wuhai, Inner Mongolia, China," *Minerals*, 10(4), hal. 323. Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/min10040323>.
- Yadav, I.C. dan Devi, N.L. (2019) "Biomass burning, regional air quality, and climate change," in J. Nriagu (ed.) *Encyclopedia of Environmental Health*. 2nd Editio. Elsevier, hal. 386–391. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11022-X>.
- Yadav, V.K., Amari, A., Gacem, A., Elboughdiri, N., Eltayeb, L.B. dan Fulekar, M.H. (2023) "Treatment of fly-ash-contaminated wastewater loaded with heavy metals by using fly-ash-synthesized iron oxide nanoparticles," *Water*, 15(5), hal. 908. Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/w15050908>.
- Zailani, W.W.A., Abdullah, M.M.A., Arshad, M.F., Burduhos-Nergis, D.D. dan Tahir, M.F.M. (2020) "Effect of Iron Oxide (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) on the Properties of Fly Ash Based Geopolymer," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 877(1), hal. 012017. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/877/1/012017>.
- Zhang, Y., Li, M., Liu, D., Hou, X., Zou, J., Ma, X., Shang, F. dan Wang, Z. (2019) "Aluminum and iron leaching from power plant coal fly ash for preparation of polymeric aluminum ferric chloride," *Environmental Technology*, 40(12), hal. 1568–1575. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1426639>.