

# Ekstraksi Silika Berbahan Dasar Coal Fly Ash Menggunakan Natrium Hidroksida

M. Bagas Ikmal R\*, Mohammad Daffa, Nurul Widji Triana

Program Studi Teknik Kimia, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

\*Koresponden email: 21031010205@student.upnjatim.ac.id

Diterima: 27 Mei 2025

Disetujui: 31 Mei 2025

## Abstract

The presence of fly ash waste will have a negative impact on the environment so that it is necessary to handle it by utilizing fly ash waste. Silica purification by extracting silica from coal fly ash aims to minimize the levels of unnecessary metal oxides (impurities). This study aims to determine the characteristics of silica produced from fly ash waste, determine the best extraction conditions to produce silica and determine the effect of extraction pH on the silica produced. Silica extraction includes several processes including leaching, extraction, and precipitation. In this study, the manufacture of silica gel begins with washing fly ash with HCl. Silica is extracted using 3M NaOH with time variations of 100 minutes, 120 minutes and 140 minutes. Furthermore, the silica in the filtrate is precipitated with 1M HCl with a pH range of 3.4, and 5 and an aging process of 18 hours and dried using an oven and characterized with an XRF instrument. The results of this study indicate that the closer to neutral the addition of HCl pH used, namely 5, the higher the mass of silica from the extraction obtained up to a maximum at an extraction time of 120 minutes with a silica yield of 63.42%. Extraction with a time of 100 minutes and 140 minutes showed that the mass of silica from the extraction obtained was lower along with the increasing acidity of the addition of HCl. The results of the water content test obtained 1.53% and ash content of 9.345% of the silica produced met the requirements of the Indonesian National Standard (SNI) No. 06-2477-1991.

**Keywords:** *coal fly ash, extraction, silica gel, hcl, x-ray fluorescence*

## Abstrak

Keberadaan limbah *fly ash* akan berdampak buruk bagi lingkungan sehingga diperlukan penanganan dengan memanfaatkan limbah *fly ash*. Pemurnian silika dengan mengekstraksi silika dari abu terbang batubara bertujuan untuk meminimalkan kadar oksida logam yang tidak diperlukan (pengotor). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik silika yang dihasilkan dari limbah *fly ash*, mengetahui kondisi terbaik ekstraksi untuk menghasilkan silika serta mengetahui pengaruh pH ekstraksi terhadap silika yang dihasilkan. Ekstraksi silika meliputi beberapa proses diantaranya *leaching*, *ekstraksi*, dan pengendapan. Pada penelitian ini, pembuatan silika gel diawali dari pencucian *fly ash* dengan HCl. Silika diekstrak menggunakan NaOH 3M dengan variasi waktu 100 menit, 120 menit dan 140 menit. Selanjutnya silika pada filtrat diendapkan dengan HCl 1M rentang pH 3,4, dan 5 serta proses aging 18 jam dan dikeringkan menggunakan oven serta dikarakterisasi dengan instrumen XRF. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa semakin mendekati netral penambahan pH HCl yang digunakan yaitu 5, maka semakin tinggi massa silika hasil ekstraksi yang diperoleh hingga maksimal pada waktu ekstraksi 120 menit dengan hasil silika yang didapatkan 63,42%. Ekstraksi dengan waktu 100 menit dan 140 menit menunjukkan bahwa massa silika hasil ekstraksi yang diperoleh semakin rendah seiring dengan semakin asam penambahan HCl. Hasil uji kadar air diperoleh 1,53% dan kadar abu 9,345% dari silika yang dihasilkan memenuhi persyaratan Standar Nasional Indonesia (SNI) No. 06-2477-1991.

**Kata Kunci:** *fly ash, ekstraksi, silika gel, hcl, x-ray fluorescence*

## 1. Pendahuluan

Fly ash merupakan limbah padat hasil pembakaran batubara yang banyak dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Limbah ini terbagi menjadi abu dasar (bottom ash) dan abu terbang (fly ash), di mana sekitar 80–90% adalah fly ash [1]. Fly ash mengandung berbagai senyawa kimia, terutama silika, alumina, dan oksida logam lain yang berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku industri [2]. Di Indonesia, produksi fly ash diperkirakan mencapai lebih dari 6 juta ton per tahun akibat tingginya konsumsi batubara sebagai sumber energi [3]. Limbah ini dikategorikan sebagai limbah B3 yang dapat menimbulkan gangguan kesehatan seperti silikosis apabila terhirup dalam jangka Panjang

[4].Pemanfaatan fly ash sebagai bahan baku pembuatan silika merupakan salah satu solusi inovatif dalam mengurangi limbah berbahaya. Kandungan silika yang tinggi dalam fly ash menjadikannya sumber potensial untuk sintesis silika industri [5].

Silika sendiri memiliki struktur kimia unik berupa jaringan tiga dimensi yang memberikan sifat stabil dan kompatibel secara biologis [6]. Senyawa ini banyak digunakan dalam berbagai industri seperti adsorben, desikan, bahan pengisi, dan katalis [7]. Ketersediaan bahan baku limbah yang murah dan melimpah juga menjadikan sintesis silika dari fly ash sebagai pendekatan yang ekonomis dan ramah lingkungan [8]. Proses ekstraksi silika dari fly ash dapat dilakukan melalui metode kimia dengan menggunakan larutan basa seperti NaOH. [9] menyusun metode pelindian dan presipitasi silika dari abu, yang terbukti cukup efektif untuk menghasilkan silika berkualitas. Dalam penelitian lanjutan, [10] menemukan bahwa pH larutan sangat memengaruhi jumlah silika yang diperoleh, di mana pH rendah meningkatkan efisiensi pelarutan. [11] menambahkan bahwa pengaturan pH pada tahap pelindian dapat menurunkan kadar logam pengotor hingga di bawah 0,1%. Kondisi proses seperti suhu, konsentrasi larutan, dan rasio pelarut juga menjadi variabel penting yang memengaruhi hasil akhir ekstraksi. Namun, efisiensi proses tidak selalu meningkat seiring dengan konsentrasi basa yang digunakan.

Menurut [12], konsentrasi NaOH sebesar 3 M dapat meningkatkan pelarutan silika, tetapi konsentrasi yang terlalu tinggi justru dapat membentuk kristal silika kembali dan menurunkan hasil ekstraksi. [13] menyoroti adanya pembentukan produk samping berupa desilication product (DSP), yang merupakan senyawa kompleks silika dan alumina yang tidak larut dan menghambat efisiensi ekstraksi. Oleh karena itu, proses ekstraksi harus dirancang dengan hati-hati agar silika yang dihasilkan memenuhi standar kualitas. Menurut Hidayat (2016), silika yang sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) harus memiliki kadar air maksimal 15% dan kadar abu tidak lebih dari 10%. Dengan pengolahan yang tepat, limbah fly ash dapat diubah menjadi produk bernilai tambah yang bermanfaat bagi industri dan ramah terhadap lingkungan.

## 2. Metode Penelitian

### Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah beaker glass, kertas saring Whatman No.41, pipet tetes, mortar dan alu, neraca analitik, oven, magnetic stirrer, kertas pH, termometer, erlemeyer, gelas ukur, corong kaca. Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah *Fly ash* yang berasal dari PLTU Paiton, aquadest, HCl 37% (Merck), NaOH (Merck)



**Gambar 1:** Rangkaian Alat *Magnetic Stirrer*

Keterangan :

1. Klem
2. Statif
3. Kabel *Thermocouple*
4. *Thermocouple*
5. *Beaker glass*
6. *Magnetic Stirrer*
7. Stop Kontak
8. Kabel *Magnetic Stirrer*

### Analisis Kandungan Bahan Baku *Fly Ash* Menggunakan XRF

Proses pengujian ini dilakukan di Laboratorium Energi dan Lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. *X-Ray Fluorescence* (XRF) ini berfungsi untuk mendeteksi unsur-unsur kimia yang terkandung serta menentukan persentase masing-masing unsur dalam sampel *fly ash*.

#### Preparasi Sampel

Sebanyak 50 gram abu layang batubara (*fly ash*) dituangkan ke dalam wadah gelas beaker, kemudian ditambah dengan 250 mL air suling panas dengan suhu 100°C. Campuran ini diaduk hingga merata dan dibiarkan selama 2 jam agar proses pelarutan atau reaksi dapat berlangsung secara optimal. Selanjutnya, larutan tersebut didekantasi untuk memisahkan fase cair dari padatan. Sisa padatan yang tertinggal kemudian dilakukan proses pengeringan dalam oven pada suhu 100°C selama 12 jam hingga kering.

#### Proses *Leaching Fly Ash*

*Fly ash* yang sudah dicuci sebanyak 30 gram dan dituang ke wadah yang berisi 180 mL aquadest. Lalu, ditambahkan larutan HCl 1M 100 mL (Kalapathy et al., 2000). Campuran ini diaduk dengan *magnetic stirrer* dengan kecepatan sebesar 150 rpm selama 2 jam agar reaksi berjalan merata. Setelah pengadukan selesai, campuran kemudian disaring menggunakan corong Buchner, lalu residu yang tertinggal dicuci dengan air suling sampai filtrat menunjukkan pH netral untuk menghilangkan ion klorida yang masih tersisa. Residu tersebut kemudian dikeringkan dalam oven dengan temperatur 110°C selama 3 jam.

#### Ekstraksi Silika dari *Fly Ash*

*Fly ash* atau abu layang batubara yang telah melalui proses *leaching* ditimbang sebanyak 25 gram, kemudian direndam dalam larutan NaOH 3M 150 mL. Proses perendaman dilakukan dengan pemanasan pada suhu 70°C dengan pengadukan konstan *magnetic stirrer* pada kecepatan 150 rpm, dengan variasi waktu ekstraksi selama 100, 110, 120, 130, dan 140 menit. Setelah ekstraksi selesai, larutan disaring menggunakan kertas saring Whatman No. 41, kemudian filtrat didinginkan hingga mencapai suhu ruang. Filtrat yang telah dingin ditambahkan larutan HCl 1M sambil diaduk secara konstan pada suhu 70°C selama 1 jam untuk memulai proses pengendapan. Penambahan larutan HCl 1M diulang untuk mencapai variasi pH masing-masing 3, 3,5, 4, 4,5, dan 5. Setelah itu, campuran didiamkan selama 18 jam untuk proses *aging*. Endapan yang terbentuk lalu disaring. Residunya diproses dengan pengeringan menggunakan oven pada suhu 110°C selama 3 jam hingga terbentuk xerogel.

#### Analisis Silika menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF), Kadar Air dan Kadar Abu

Pada penelitian ini, metode *X-Ray Fluorescence* (XRF) digunakan untuk menganalisis *fly ash* dengan tujuan mengetahui kandungan unsur-unsur kimia yang terdapat di dalamnya, serta menentukan konsentrasi masing-masing unsur. Pengujian XRF dilakukan di Laboratorium Penelitian dan Pengujian Terpadu Universitas Gadjah Mada dengan metode uji ED-XRF Kualitatif (*Fundamental Parameter/Standardless*), menggunakan sampel seberat 3 gram. Selain itu, penelitian ini juga melibatkan pengujian kadar air dan kadar abu pada *fly ash*, yang dilakukan di Laboratorium Terpadu UPN “Veteran” Jawa Timur menggunakan metode gravimetri.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini menggunakan metode ekstraksi padat-cair (*leaching*), yaitu proses perpindahan massa antara dua fasa. Dalam proses ini, *fly ash* berperan sebagai fasa padat, sedangkan NaOH digunakan sebagai pelarut (*solvent*) [14]. Sebelum tahap ekstraksi dilakukan, *fly ash* terlebih dahulu dianalisis menggunakan XRF untuk mengetahui kandungan unsur di dalamnya.

**Tabel 1.** Hasil Uji *X-Ray Fluorescence* (XRF) *Fly Ash*

| Komponen  | Hasil (%mass) |
|-----------|---------------|
| $Al_2O_3$ | 8,1           |
| $SiO_2$   | 24            |
| $P_2O_5$  | 0,6           |
| $SO_3$    | 1,3           |
| $K_2O$    | 1,82          |
| $CaO$     | 30            |
| $TiO_2$   | 1,88          |
| $Fe_2O_3$ | 30            |
| $Cr_2O_3$ | 0,03          |
| $CuO$     | 0,12          |
| $ZnO$     | 0,12          |
| $BaO$     | 0,49          |
| $V_2O_5$  | 0,07          |

|           |       |
|-----------|-------|
| $Re_2O_7$ | 0,06  |
| $NiO$     | 0,041 |

*Fly ash* yang digunakan mengandung silika sebesar 24%. Proses leaching diawali dengan merendam 50 gram *fly ash* dalam 180 mL aquadest, kemudian ditambahkan 100 mL larutan HCl 1M dan diaduk. Selanjutnya, *fly ash* hasil leaching direndam dalam larutan NaOH dan dipanaskan pada suhu 70°C sambil diaduk dengan kecepatan 150 rpm dalam variasi waktu tertentu. Setelah proses tersebut, campuran disaring dan filtrat yang diperoleh diberi tambahan HCl 1M dengan variasi pH. Proses aging dilakukan selama 18 jam. Tahap aging ini bertujuan untuk mempermudah pelarutan silika, sementara pemanasan dan pengadukan berperan dalam mempercepat laju ekstraksi.

**Pengaruh pH HCl dan Waktu Ekstraksi terhadap Massa Silika Hasil Ekstraksi**

Analisis karakteristik unsur dan oksida logam berat dalam limbah *fly ash* dilakukan menggunakan instrumen kimia *X-Ray Fluorescence* (XRF). Variasi pH HCl serta durasi ekstraksi berpengaruh terhadap jumlah silika yang dihasilkan

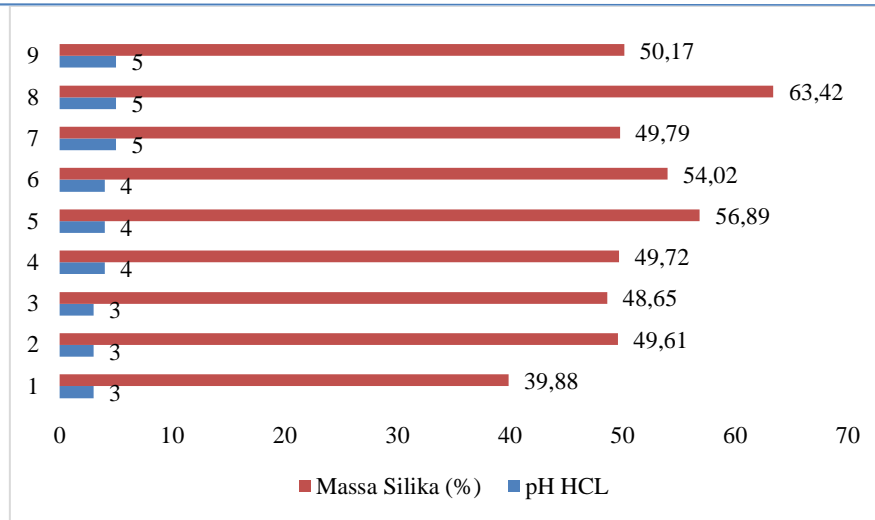
**Tabel 2.** Pengaruh pH HCl dan Waktu Ekstraksi Terhadap Massa Silika yang diperoleh

| pH HCl | Waktu Ekstraksi (menit) | Kandungan Silika (%) |
|--------|-------------------------|----------------------|
| 3      | 100                     | 39,88                |
|        | 120                     | 49,61                |
|        | 140                     | 48,65                |
| 4      | 100                     | 49,72                |
|        | 120                     | 56,89                |
|        | 140                     | 54,02                |
| 5      | 100                     | 49,79                |
|        | 120                     | 63,42                |
|        | 140                     | 50,17                |

Berdasarkan data yang diperoleh, kadar silika tertinggi tercatat sebesar 63,42% pada kondisi pH HCl 5 dan waktu ekstraksi selama 120 menit. Sementara itu, kadar silika terendah yaitu 39,48% diperoleh pada pH HCl 3 dengan waktu ekstraksi 100 menit. Proses ekstraksi menggunakan HCl dengan konsentrasi 1M, di mana semakin tinggi konsentrasi asam, jumlah proton dalam larutan pun meningkat. Hal ini mendorong peningkatan gugus silanol yang berpengaruh terhadap pembentukan silika[15]. Selain itu, hasil ekstraksi berupa jumlah massa silika juga dipengaruhi oleh faktor yaitu proses pengasaman. pH optimal untuk menghasilkan endapan silika dalam proses pengasaman dengan HCl adalah pH 5 [16].

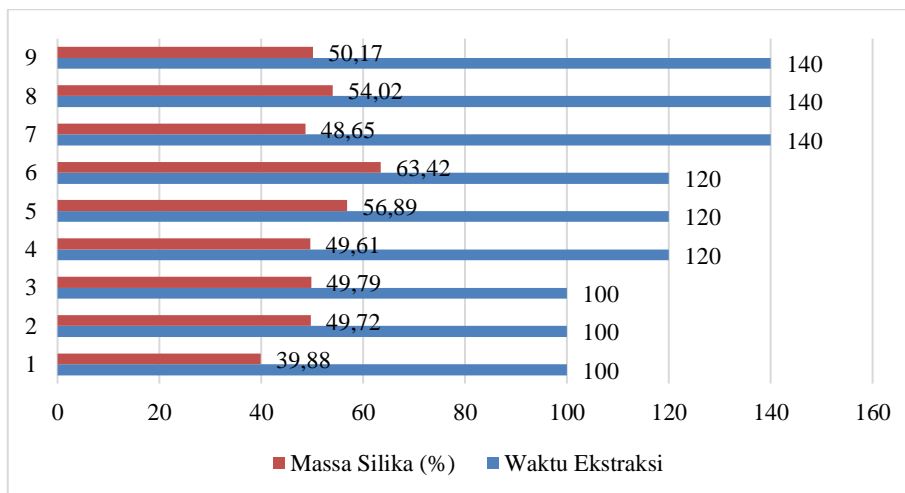
Kadar silika hasil ekstraksi menunjukkan peningkatan seiring bertambahnya waktu ekstraksi pada 100 menit hingga mencapai puncaknya pada 120 menit, namun mengalami penurunan kembali pada waktu ekstraksi 140 menit. Tren serupa juga terlihat pada berbagai variasi pH, di mana kadar silika meningkat dengan lamanya waktu ekstraksi hingga 120 menit, kemudian menurun pada 140 menit. Hal ini mengindikasikan bahwa setelah waktu dan pH terbaik tercapai, efisiensi ekstraksi silika justru menurun. Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh kemampuan pelarut yang tinggi terhadap silika, yang mengakibatkan natrium silikat yang terbentuk terdegradasi menjadi  $Na_2O$  dan mengendap dalam *fly ash*, sehingga kandungan silika dalam filtrat berkurang [17]. Oleh karena itu, kondisi optimal ekstraksi diperoleh pada pH HCl 5 dengan waktu ekstraksi 120 menit.

Selain itu, konsentrasi larutan NaOH juga memengaruhi hasil ekstraksi. Faktor waktu ekstraksi serta konsentrasi pelarut yang terlalu tinggi justru dapat menurunkan efisiensi ekstraksi. Hal ini disebabkan oleh degradasi silikat akibat konsentrasi yang berlebihan [16]. Konsentrasi NaOH yang tinggi dalam proses ekstraksi silika dari *fly ash* memang dapat melarutkan senyawa oksida lain selain silika. Hal ini terjadi karena reaksi ekstraksi melibatkan pembentukan ikatan ion antara senyawa oksida dalam *fly ash* dan NaOH sebagai agen ekstraktor. Oleh karena itu, pengendalian konsentrasi NaOH sangat penting untuk menjamin selektivitas ekstraksi silika serta mencegah terikutnya senyawa oksida lain yang dapat menjadi pengotor dalam aplikasi tertentu.



**Gambar 2:** Hubungan Pengaruh Variasi pH HCl Terhadap Massa Silika yang didapatkan

**Gambar 2** memperlihatkan pengaruh variasi pH HCl (3, 4, dan 5) terhadap massa silika yang dihasilkan dari proses ekstraksi. Berdasarkan data yang ditampilkan, peningkatan pH hingga mencapai nilai 5 menyebabkan peningkatan massa silika secara signifikan. Sebagai contoh, pada waktu ekstraksi selama 120 menit, massa silika meningkat dari 49,61% pada pH 3 menjadi 63,42% pada pH 5. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh tingginya konsentrasi ion  $H^+$  pada pH rendah, yang dapat menghambat proses pembentukan dan pengendapan silika. Sebaliknya, pada kondisi pH yang lebih mendekati netral, pembentukan gugus silanol ( $Si-OH$ ) berlangsung lebih stabil, sehingga mendukung pengendapan silika secara maksimal. Dengan demikian, pH 5 dianggap sebagai kondisi ideal untuk memperoleh massa silika tertinggi. Temuan ini konsisten dengan literatur yang menyatakan bahwa pH optimal untuk pengendapan silika berkisar antara 4,5 hingga 6, tergantung pada karakteristik awal bahan baku dan kondisi proses[15,16]



**Gambar 3:** Hubungan Pengaruh Variasi Waktu Ekstraksi Terhadap Massa Silika yang didapatkan

**Gambar 3** menunjukkan hubungan antara waktu ekstraksi (100, 120, dan 140 menit) dengan massa silika yang dihasilkan pada masing-masing variasi pH HCl (3, 4, dan 5). Dari grafik tersebut terlihat bahwa peningkatan durasi ekstraksi dari 100 menjadi 120 menit menghasilkan peningkatan massa silika yang cukup signifikan di semua nilai pH. Sebagai contoh, pada pH 5, massa silika meningkat dari 49,79% (100 menit) menjadi 63,42% (120 menit). Hal ini mengindikasikan bahwa proses ekstraksi memerlukan waktu tertentu agar silika dapat larut secara optimal dalam larutan NaOH dan kemudian terendapkan secara efektif oleh HCl. Namun, ketika waktu ekstraksi diperpanjang hingga 140 menit, terjadi penurunan massa silika pada ketiga variasi pH. Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh kejenuhan larutan atau degradasi senyawa natrium silikat akibat pemanasan dan pengadukan yang terlalu lama. Proses tersebut dapat menyebabkan konversi natrium silikat menjadi senyawa lain, seperti natrium oksida ( $Na_2O$ ), yang tidak mengendap sebagai silika, sehingga mengurangi jumlah silika dalam filtrat. Oleh karena itu, waktu ekstraksi selama 120 menit dianggap sebagai kondisi optimal dalam proses ini.

## Hasil Uji Kadar Air dan Kadar Abu

Metode analisa yang digunakan untuk menguji kadar air dan kadar abu yang terdapat dalam limbah *fly ash* adalah dengan menggunakan uji dengan metode gravimetri. Berikut ini pada tabel 3 merupakan data hasil uji kadar air dan kadar abu

**Tabel 3.** Hasil Uji Kadar Air dan Kadar Abu

| Parameter Uji | Hasil (%) |
|---------------|-----------|
| Kadar Air     | 1,53      |
| Kadar Abu     | 9,345     |

Analisis kadar air dan kadar abu pada limbah *fly ash* menggunakan metode gravimetri merupakan pendekatan yang efektif untuk mengetahui komposisi fisik dan kimia dari material tersebut. Prosedur ini melibatkan tahap pengeringan sampel pada suhu 105°C untuk menentukan kadar air, kemudian dilanjutkan dengan pembakaran pada suhu 550°C guna mengukur kadar abu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki kadar air sebesar 1,53% dan kadar abu sebesar 9,345%. Nilai kadar air yang rendah mengindikasikan tingkat kelembaban yang minim, yang penting dalam aplikasi seperti bahan tambahan konstruksi, karena kelembaban dapat memengaruhi kekuatan dan ketahanan material. Di sisi lain, kadar abu yang cukup tinggi menunjukkan adanya kandungan mineral anorganik yang signifikan, yang berpengaruh terhadap sifat fisik dan kimia *fly ash* tersebut [18].

Berdasarkan hasil analisis kadar air dan abu pada silika hasil ekstraksi dari *fly ash*, dapat disimpulkan bahwa silika yang diperoleh telah memenuhi standar kualitas sesuai ketentuan Standar Nasional Indonesia (SNI) No. 06-2477-1991. SNI menetapkan bahwa silika harus memiliki kadar air maksimum 15% dan kadar abu tidak lebih dari 10% [19]. Dengan kadar air 1,53% dan kadar abu 9,345%, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa silika yang dihasilkan telah sesuai dengan standar mutu yang ditetapkan, sehingga layak untuk digunakan sesuai fungsinya.

## 4. Kesimpulan

Ekstraksi silika memberikan hasil maksimal pada pH 5 dan waktu ekstraksi selama 120 menit, dengan kandungan silika tertinggi 63,42%. Hasil uji kadar air (1,53%) dan kadar abu (9,345%) dari silika yang dihasilkan memenuhi Standar Nasional Indonesia (SNI) No. 06-2477-1991 dimana kadar air maksimal 15% dan kadar abu maksimal 10%. Variasi waktu dan pH ekstraksi berpengaruh terhadap hasil ekstraksi silika. Peningkatan waktu ekstraksi hingga 120 menit meningkatkan kadar silika, namun penurunan terjadi pada 140 menit disebabkan oleh degradasi natrium silikat menjadi  $\text{Na}_2\text{O}$  yang mengendap kembali dalam *fly ash*.

## 5. Saran

Penulis menyarankan untuk melakukan penambahan parameter ekstraksi, seperti konsentrasi pelarut NaOH dan suhu proses, guna meningkatkan efisiensi ekstraksi dan kemurnian silika yang dihasilkan. Penelitian sebelumnya menjabarkan bahwa konsentrasi NaOH dan suhu ekstraksi berpengaruh signifikan terhadap hasil ekstraksi silika. Penulis juga menyarankan potensi aplikasi silika yang dihasilkan dalam berbagai bidang, seperti bahan adsorben, katalis, atau bahan tambahan dalam industri konstruksi, untuk meningkatkan nilai tambah dari limbah *fly ash*. Pemanfaatan silika dari *fly ash* dapat menjadi solusi berkelanjutan dalam mengurangi dampak lingkungan dari limbah industri.

## 6. Daftar Pustaka

- [1] A. J. Van der Merwe *et al.*, "Characterization of coal fly ash for beneficiation applications," *J. Environ. Manage.*, 2014.
- [2] R. S. Blissett *et al.*, "Properties of fly ash from co-combustion of biomass and coal," *Fuel*, 2012.
- [3] BAPPENAS, *Laporan Tahunan Produksi Batubara Nasional*, Jakarta: Badan Perencanaan Pembangunan Nasional, 2019.
- [4] BAPEDAL, *Dampak Kesehatan Akibat Limbah Industri*, Jakarta: Badan Pengendalian Dampak Lingkungan, 1999.
- [5] Sukandarrumidi, *Batu Bara dan Pemanfaatannya*, Yogyakarta: Gadjah Mada University Press, 2009.
- [6] R. K. Iler, *The Chemistry of Silica*, New York: Wiley, 1978.
- [7] Muchjidin, *Kimia Pemanfaatan Batubara*, Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada, 2006.
- [8] W. A. Wardhana, *Limbah Industri dan Pengelolaannya*, Yogyakarta: Andi Offset, 2006.

- [9] U. Kalapathy, A. Proctor, and J. Shultz, "An improved method for production of silica from rice hull ash," *Bioresour. Technol.*, vol. 73, no. 3, pp. 257–262, 2000.
- [10] U. Kalapathy, A. Proctor, and J. Shultz, "A simple method for production of pure silica from rice hull ash," *Bioresour. Technol.*, vol. 79, no. 3, pp. 205–211, 2002.
- [11] R. Prasad and M. Pandey, "Optimization of silica extraction from rice husk," *J. Hazard. Mater.*, vol. 217–218, pp. 431–438, 2012.
- [12] X. Wang *et al.*, "Silica extraction from coal fly ash: Optimization and mechanistic study," *J. Clean. Prod.*, vol. 412, 2024.
- [13] J. Ma *et al.*, "Characterization of desilication product in aluminosilicate residue," *Miner. Eng.*, vol. 145, 2020.
- [14] Harimu, "Pengaruh Konsentrasi NaOH terhadap Ekstraksi Silika dari Fly Ash," *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*, vol. 6, no. 2, pp. 45–52, 2019.
- [15] Meidinariasty, L. N., Fajriani, L., and Ramadhan, A. M., "Sintesis Silika Gel dari Sekam Padi melalui Ekstraksi Basa dan Pengendapan Asam," *Jurnal Teknologi Kimia dan Industri*, vol. 10, no. 1, pp. 11–19, 2020.
- [16] Caroles, R. P., "Optimasi Ekstraksi Silika dari Abu Sekam Padi Menggunakan Metode Sol-Gel," *Jurnal Teknologi Material*, vol. 8, no. 3, pp. 33–40, 2019.
- [17] Mujiyanti, E., "Pemanfaatan Fly Ash sebagai Sumber Silika: Studi Degradasi Natrium Silikat," *Jurnal Kimia Terapan*, vol. 5, no. 1, pp. 22–27, 2021.
- [18] Purnomo, A., "Analisis Kadar Air dan Abu pada Fly Ash untuk Aplikasi Bahan Bangunan," *Jurnal Riset Material dan Energi*, vol. 4, no. 2, pp. 66–71, 2022.
- [19] T. Hidayat, *Standar SNI dan Aplikasinya dalam Industri*, Bandung: Balai Besar Keramik, 2016.