

# Sintesis dan Karakterisasi Nanosilika dari Limbah *Silica Scaling* PLTP Dieng Melalui Metode *Alkali Fusion* NaOH

Riko Aulia Rachman<sup>1</sup>, Muhammad Waziz Wildan<sup>1</sup>, Fajar Fitriani<sup>1</sup>

Universitas Gadjah Mada

DOI: <https://10.47134/jme.v1i1.2194>

\*Correspondensi: Muhammad Waziz Wildan

Email: [m\\_wildan@ugm.ac.id](mailto:m_wildan@ugm.ac.id)

Published: 25 January 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

**Abstrak:** *Silica scaling* merupakan masalah utama yang timbul pada operasi pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) di Dieng. *Silica scaling* dapat mengganggu produksi listrik dan menimbulkan penumpukan limbah di lingkungan. *Silica scaling* memiliki kandungan silika ( $\text{SiO}_2$ ) yang tinggi sehingga memiliki potensi untuk dimanfaatkan menjadi material yang bernilai tambah, yaitu nanosilika. Salah satu metode untuk mendapatkan nanosilika adalah alkali fusi. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan nanosilika dari limbah *silica scaling* PLTP Dieng melalui metode alkali fusi sekaligus mengetahui karakteristik nanosilika yang dihasilkan. Proses alkali fusi dilakukan menggunakan NaOH sebagai sumber alkali. Kemudian dilakukan pencampuran serbuk *silica scaling* dan NaOH pada variasi suhu  $600^\circ\text{C}$ ,  $650^\circ\text{C}$ , dan  $700^\circ\text{C}$  untuk menghasilkan nanosilika. Nanosilika yang dihasilkan kemudian dikarakterisasi untuk mengonfirmasi keberhasilan proses sintesis dalam menghasilkan partikel nanosilika. Karakterisasi yang dilakukan meliputi x-ray diffraction (XRD) untuk karakterisasi kristalinitas,

fourier transform infra red (FTIR) untuk karakterisasi gugus fungsi, transmission electron microscope (TEM) dan particle size analyzer (PSA) untuk mengetahui ukuran partikel. Hasil dari penelitian ini didapatkan bahwa nanosilika amorf berhasil disintesis dari *silica scaling* menggunakan metode alkali fusi NaOH. Didapatkan dari hasil karakterisasi TEM dan PSA bahwa ukuran partikel terkecil dihasilkan pada suhu fusi  $650^\circ\text{C}$ . Lebih lanjut, data FTIR juga mengonfirmasi adanya gugus fungsi pada bilangan gelombang yang identik dengan silika.

**Kata Kunci:** Nanosilika, *Silica Scaling*, Alkali Fusi

**Abstrak:** *Silica scaling* is the main problem that arises in the operation of geothermal power plants (PLTP) in Dieng. *Silica scaling* can disrupt electricity production and cause a buildup of waste in the environment. *Silica scaling* has a high silica ( $\text{SiO}_2$ ) content so it has the potential to be used as a value-added material, namely nanosilica. One method to obtain nanosilica is alkali fusion. This research aims to obtain nanosilica from *silica scaling* waste from PLTP Dieng using the alkali fusion method as well as knowing the characteristics of the nanosilica produced. The alkali fusion process is carried out using NaOH as an alkali source. Then mixing *silica scaling* powder and NaOH at varying temperatures of  $600^\circ\text{C}$ ,  $650^\circ\text{C}$  and  $700^\circ\text{C}$  to produce nanosilica. The resulting nanosilica was then characterized to confirm the success of the synthesis process in producing nanosilica particles. The characterization carried out included x-ray diffraction (XRD) to characterize crystallinity, Fourier transform infrared (FTIR) to characterize functional groups, transmission electron microscope (TEM) and particle size analyzer (PSA) to determine particle size. The results of this research showed that amorphous nanosilica was successfully synthesized from *silica scaling* using the NaOH alkali fusion method. It was found from the results of TEM and PSA characterization that the smallest particle size was produced at a fusion temperature of  $650^\circ\text{C}$ . Furthermore, FTIR data also confirms the existence of functional groups at wave numbers identical to silica.

**Keywords:** Nanosilika, *Silica Scaling*, Alkali Fusi

## PENDAHULUAN

*Silica scaling* adalah endapan silika yang terbentuk pada proses pengoperasian pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) Dieng. *Silica scaling* menjadi salah satu masalah utama dalam pengoperasian PLTP Dieng. *Silica scaling* dapat menyebabkan penyumbatan pada pipa fluida panas bumi dengan potensi penebalan mencapai maksimal 9,52 cm/tahun (Wahyudityo dkk., 2013). Hal ini dapat menyebabkan terhambatnya produksi listrik PLTP (Pambudi dkk., 2015). Selain itu, *silica scaling* Dieng juga memiliki potensi endapan mencapai 179,16 ton/tahun di perangkat *weir box* (Utami et dkk., 2014) sehingga berpotensi untuk menimbulkan penumpukan menjadi limbah *silica scaling* di lingkungan.

Kandungan utama pada material *silica scaling* adalah silika ( $\text{SiO}_2$ ) dengan kandungan silika mencapai 88,45 % (Silviana dkk., 2017) hingga 96,79 % (Adiatama dkk., 2022). Kandungan silika yang tinggi pada *silica scaling* membuat *silica scaling* memiliki potensi untuk dimanfaatkan menjadi material yang bernilai tambah, yaitu nanosilika. Nanosilika sendiri dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang seperti *nanofiller* pada produk berbahan karet (Sudhakaran dan Avirah, 2022), penguat pada semen geopolimer (Rahmawati dkk., 2021), hingga biomedis (Singh dkk., 2019). Proses sintesis nanosilika dari sumber alam dapat dilakukan melalui berbagai metode. Beberapa metode yang telah dilakukan dalam sintesis nanosilika antara lain sol-gel (Jenie dkk., 2018), hidrotermal (Hasri dkk., 2021), *alkali fusion* (Wahyudi dkk., 2013; Hamzah dkk., 2022), dll. Metode *alkali fusion* merupakan salah satu metode dengan beberapa keunggulan seperti waktu sintesis yang relatif cepat (Hamzah dkk., 2022) dan tidak memerlukan energi yang besar karena keberadaan katalisator berupa senyawa alkali yang membuat suhu ekstraksi silika menjadi turun (Munasir dkk., 2013).

Beberapa penelitian telah dilakukan mengenai sintesis nanosilika dari limbah *silica scaling*. Beberapa penelitian menggunakan metode sol-gel (Jenie dkk., 2018; Adiatama dkk., 2022; Suryadi dkk., 2023) dan sol-presipitasi (Pambudi dkk., 2022). Belum ada penelitian yang memiliki fokus pada penggunaan metode *alkali fusion* dalam sintesis nanosilika dari limbah *silica scaling* PLTP Dieng. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan sintesis dengan metode *alkali fusion* dengan tujuan untuk memperoleh nanosilika dari limbah *silica scaling* PLTP Dieng sekaligus mengetahui karakteristik nanosilika yang dihasilkan dari metode tersebut. Diharapkan hasil penelitian ini dapat menjadi solusi untuk mengatasi permasalahan yang timbul dari limbah *silica scaling*.

## METODE

### Alat dan Bahan

Bahan utama dari penelitian ini adalah sampel *silica scaling* yang diperoleh dari PLTP Geo Dipa Energi Dieng dalam bentuk bongkahan. Bahan pendukung antara lain sodium hidroksida (NaOH) dan asam klorida (HCl) 2M dengan merek Merck, serta akuades. Alat yang digunakan antara lain timbangan digital, *horizontal ball mill*, *sieve shaker*, *magnetic stirrer*, buret dan statif, oven dan *furnace*. Alat yang digunakan untuk karakterisasi antara lain alat *x-ray diffraction* (Malvern Panalytical), *fourier transform infra-red* (Shimadzu

IRAffinity-1S), *transmission electron microscope* (JEOL JEM-1400), dan *particle size analyzer* (Microtrac Nanotrac Wave II).

### **Penyiapan Material Silica Scaling**

Bongkahan *silica scaling* yang diperoleh dari lapangan panas bumi dicuci beberapa kali menggunakan air PDAM untuk membersihkannya dari pengotor. Kemudian sampel *silica scaling* dihancurkan menggunakan *horizontal ball mill* sehingga ukuran partikelnya berkurang secara signifikan dan diperoleh serbuk *silica scaling*. Selanjutnya dilakukan pengayakan menggunakan alat *sieve shaker*. Serbuk *silica scaling* yang akan diproses lebih lanjut adalah serbuk dengan ukuran partikel <140 mesh atau < 105  $\mu\text{m}$ .

### **Alkali fusion pada Serbuk Silica scaling**

Sintesis nanosilika dilakukan menggunakan metode *alkali fusion*. Serbuk *silica scaling* dengan ukuran < 105  $\mu\text{m}$  dan NaOH dicampur secara stoikiometris dengan perbandingan massa *silica scaling* : NaOH sebesar 1 : 1,333. Kemudian campuran tersebut diberikan perlakuan panas dengan penahanan selama 1 jam di *furnace* pada variasi suhu 600°C, 650°C, dan 700°C. Sampel pada masing-masing perlakuan suhu diberikan kode NS600 (suhu 600°C), NS650 (suhu 650°C), dan NS700 (suhu 700°C). Dalam proses *alkali fusion* ini dihasilkan serbuk natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ).

### **Sintesis Nanosilika**

Serbuk natrium silikat dilarutkan dengan akuades di gelas *beaker* dan didiamkan selama 24 jam. Kemudian larutan disaring dan dilakukan proses titrasi larutan natrium silikat menggunakan HCl 2M. Titrasi dilakukan secara simultan dengan pengadukan di *magnetic stirrer* dengan kecepatan 500 rpm dan dilakukan pada suhu ruang. Titrasi dan pengadukan dijalankan hingga terjadi *gelation* yaitu pengendapan gel nanosilika. Gel nanosilika kemudian dibiarkan selama 18 jam. Selanjutnya gel nanosilika dicuci beberapa kali menggunakan akuades hingga pH netral. Kemudian gel nanosilika disaring menggunakan kertas saring dan dikeringkan pada suhu 105°C selama 10 jam dan dihancurkan sehingga diperoleh serbuk nanosilika.

### **Karakterisasi**

Karakterisasi *x-ray diffraction* (XRD) dilakukan untuk mengetahui kristalinitas dari serbuk nanosilika yang dihasilkan. Analisis *fourier transform infrared* (FTIR) dilakukan untuk mengetahui gugus fungsi yang muncul pada serbuk nanosilika. Sementara itu, karakterisasi menggunakan *transmission electron microscope* (TEM) dan *particle size analyzer* (PSA) dilakukan untuk menganalisis ukuran dan distribusi ukuran partikel nanosilika yang dihasilkan.

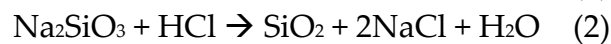
## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Sintesis Nanosilika**

Pada penelitian ini terdapat dua tahapan dalam sintesis nanosilika. Tahap pertama adalah *alkali fusion* yang berprinsip pada pencampuran antara *silica scaling* dengan sumber alkali (NaOH) pada suhu tinggi. Pada penelitian ini suhu yang digunakan bervariasi sebesar 600°C, 650°C, dan 700°C. Proses *alkali fusion silica scaling* dan NaOH dengan

perbandingan stoikiometris akan menghasilkan natrium silikat (Allendorf dan Spear, 2001) dengan reaksi yang ditunjukkan pada Persamaan (1). Fenomena ini dapat terjadi karena pada suhu tinggi struktur tetrahedral silika akan saling terpisah karena ikatan kation dan anion cenderung lemah (Schweigert dkk., 2002). Oleh karena itu terjadi ikatan antara NaOH dan silika yang membentuk natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ).

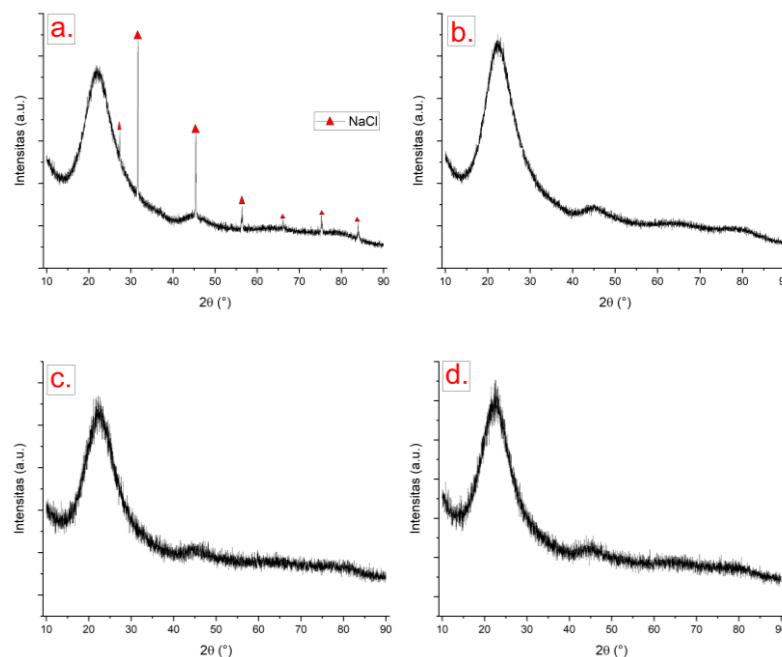
Tahap kedua adalah pembentukan gel nanosilika dengan titrasi dari HCl. Menurut (Hamzah dkk., 2022) reaksi pembentukan gel nanosilika ini ditunjukkan pada Persamaan (2). Gel nanosilika yang terbentuk berupa endapan berwarna putih yang kemudian disaring dan dikeringkan sehingga terbentuk serbuk nanosilika.



### Karakterisasi Sifat Kristalinitas Nanosilika

Sifat kristalinitas dari nanosilika dikarakterisasi menggunakan metode *x-ray diffraction* (XRD). Hasil karakterisasi sifat kristalinitas ini dapat diamati pada Gambar 1. Berdasarkan hasil karakterisasi menggunakan XRD didapatkan bahwa nanosilika yang dihasilkan melalui metode *alkali fusion* pada semua variasi suhu memiliki puncak melebar yang berpusat pada sudut  $2\theta$  sebesar  $22^\circ$ . Menurut (Adiatama dkk., 2022) bahwa nanosilika dengan pola puncak melebar pada rentang  $16,3^\circ - 33,8^\circ$  merupakan karakter nanosilika amorf.

Selain mengonfirmasi struktur nanosilika adalah amorf, karakterisasi XRD juga mengindikasikan bahwa metode *alkali fusion* dapat menghasilkan nanosilika dengan kemurnian tinggi. Hal ini dapat diamati pada pola XRD Gambar 1.a. bahwa pada sampel mentah *silica scaling* terdapat puncak-puncak pada sudut  $27,4^\circ$ ,  $31,7^\circ$ ,  $45,4^\circ$ ,  $56,7^\circ$  dan  $66,2^\circ$  yang identik dengan pola puncak dari NaCl (Bao dkk., 2017). Sementara itu, pada semua nanosilika hasil sintesis *alkali fusion* (NS600, NS650, dan NS700) tidak teramati puncak-puncak lain selain pola nanosilika amorf.

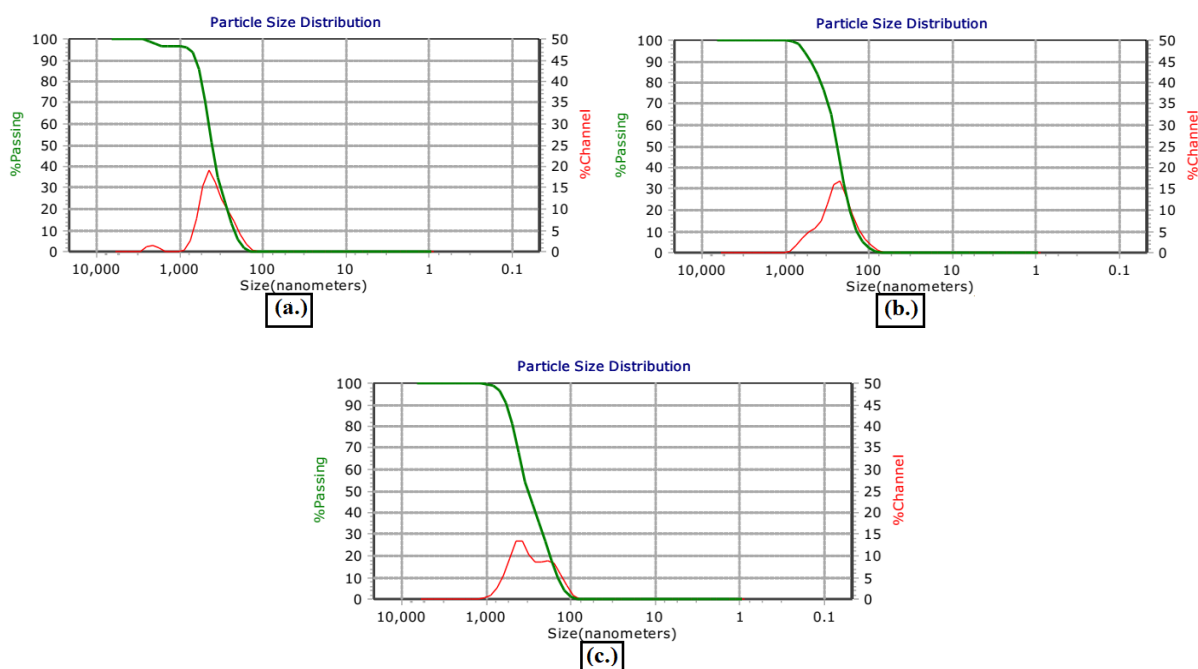


Gambar 1. Pola XRD material a.) *silica scaling*, b.) NS600, c.) NS650, dan d.) NS700

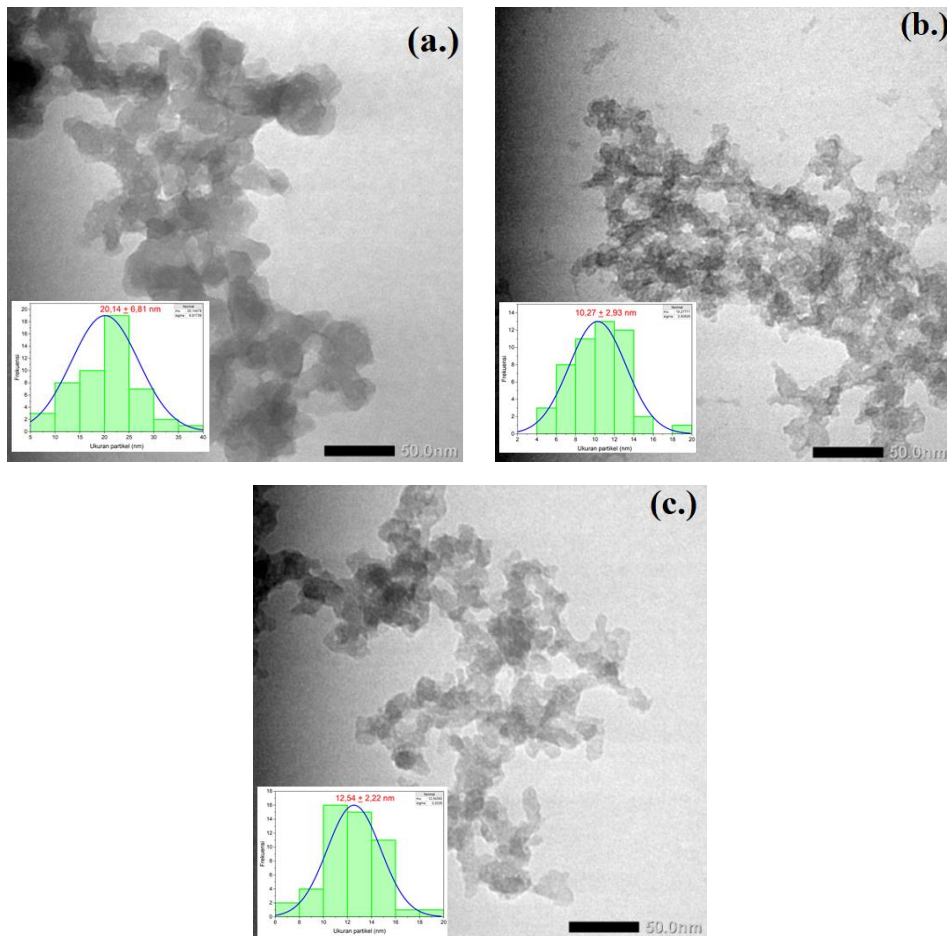
## Karakterisasi Ukuran Partikel Nanosilika

Karakterisasi ukuran partikel nanosilika dilakukan untuk mengonfirmasi bahwa nanosilika yang dihasilkan berada pada rentang ukuran nano, yaitu  $< 100$  nm. Terdapat 2 metode karakterisasi yang dilakukan untuk mengetahui ukuran partikel nanosilika. Karakterisasi menggunakan *particle size analyzer* (PSA) dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran partikel nanosilika seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Hasil PSA menunjukkan bahwa nanosilika NS600 memiliki ukuran partikel pada rentang 396 nm dan sedikit pada rentang 2130 nm. Sementara sampel NS650 memiliki ukuran partikel pada rentang 244,6 nm dan NS700 memiliki ukuran partikel pada rentang 387 nm dan sedikit pada 156,9 nm. Hasil PSA menunjukkan bahwa ukuran partikel nanosilika  $> 100$  nm. Menurut (Munasir dkk., 2013) hal ini dapat terjadi karena pada pengukuran PSA nanosilika didispersikan pada akuades sehingga berpeluang besar terjadi penggumpalan partikel nanosilika. Nilai ukuran partikel yang cukup besar ini mengindikasikan bahwa pada nanosilika yang dihasilkan masih terdapat penggumpalan partikel.

Pengamatan TEM dilakukan untuk mengonfirmasi lebih lanjut ukuran partikel nanosilika hasil sintesis. Hasil pengamatan TEM dapat diamati pada Gambar 3 untuk kemudian dilakukan analisis ukurannya. Rata-rata ukuran partikel nanosilika NS600, NS650, dan NS700 berturut-turut sebesar  $20,14 \pm 6,81$  nm,  $10,27 \pm 2,93$  nm, dan  $12,54 \pm 2,22$  nm. Hal ini menunjukkan bahwa nanosilika yang dihasilkan melalui metode *alkali fusion* sejatinya telah berada pada skala nano ( $< 100$  nm) untuk semua variasi suhu. Pengamatan TEM juga mengonfirmasi terjadinya penggumpalan pada partikel nanosilika sehingga pengukuran PSA menunjukkan ukuran partikel yang cukup besar. Secara umum, baik pengukuran partikel menggunakan PSA dan TEM menunjukkan bahwa ukuran partikel terkecil diperoleh pada NS650.



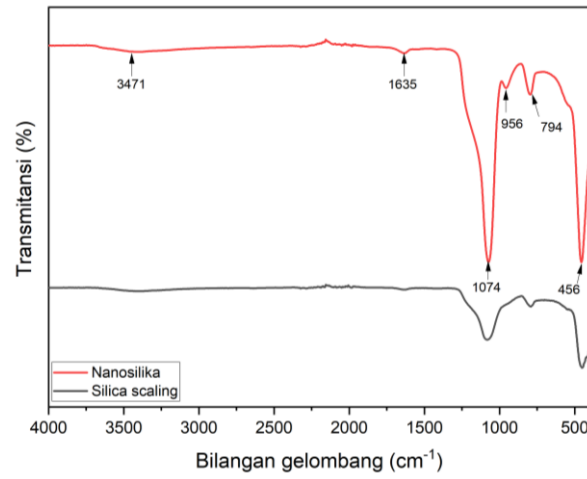
Gambar 2. Hasil pengukuran PSA a.) NS600, b.) NS650, dan c.) NS700



Gambar 3. Hasil pengamatan dan pengukuran TEM a.) NS600, b.) NS650, dan c.) NS700  
**Karakterisasi Gugus Fungsi Nanosilika**

Gambar 4 menunjukkan pola hasil karakterisasi spektrum FTIR dari nanosilika dan *silica scaling*. Terdapat beberapa gugus-gugus fungsi yang terdeteksi. Gugus-gugus fungsi tersebut antara lain uluran gugus fungsi Si-O-Si (siloksan) pada bilangan gelombang  $1074\text{ cm}^{-1}$  (Rahim dkk., 2023) dan  $794\text{ cm}^{-1}$  (Pambudi dkk., 2022). Selain itu, terdeteksi juga gugus fungsi Si-OH pada bilangan gelombang  $956\text{ cm}^{-1}$  (Al-Oweini dan El-Rassy, 2009). Lebih lanjut, terdapat juga gugus fungsi berupa vibrasi asimetris O-Si-O pada bilangan gelombang  $456\text{ cm}^{-1}$  (Suryadi dkk., 2023). Karakterisasi FTIR ini mengonfirmasi bahwa nanosilika hasil sintesis memiliki gugus fungsi pada bilangan gelombang yang identik dengan silika.





Gambar 4. Pola FTIR dari nanosilika dan *silica scaling*

### SIMPULAN

Metode *alkali fusion* NaOH dapat diaplikasikan untuk proses sintesis nanosilika dari limbah *silica scaling* PLTP Dieng. Nanosilika yang diperoleh memiliki karakteristik berupa nanosilika amorf dengan kemurnian silika lebih tinggi dibandingkan limbah *silica scaling*. Berdasarkan pengukuran PSA dan pengamatan TEM didapatkan bahwa nanosilika yang diperoleh cenderung mengalami penggumpalan partikel. Berdasarkan pengamatan dan pengukuran TEM bahwa ukuran partikel nanosilika yang diperoleh telah berada pada skala nano (< 100 nm) dengan rata-rata ukuran partikel terkecil diperoleh pada suhu *fusion* 650°C. Lebih lanjut, karakterisasi FTIR menunjukkan bahwa nanosilika yang dihasilkan memiliki gugus fungsi pada bilangan gelombang yang identik dengan silika. Dengan demikian, Metode *alkali fusion* memiliki potensi besar untuk diterapkan dalam proses sintesis skala besar nanosilika dari limbah *silica scaling* PLTP Dieng sekaligus menjadi solusi permasalahan limbah *silica scaling*.

### DAFTAR PUSTAKA

- Adiatama, A. R., Susanti, R. F., Astuti, W., Petrus, H. T. B. M., & Wanta, K. C. (2022). Synthesis and Characteristic of Nanosilica From Geothermal Sludge: Effect of Surfactant. *Metalurgi*, 37(2), 73–86. <https://doi.org/10.14203/METALURGI.V37I2.637>
- Al-Oweini, R., & El-Rassy, H. (2009). Synthesis and characterization by FTIR spectroscopy of silica aerogels prepared using several Si(OR)<sub>4</sub> and R''Si(OR')<sub>3</sub> precursors. *Journal of Molecular Structure*, 919(1–3), 140–145. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2008.08.025>
- Allendorf, M. D., & Spear, K. E. (2001). Thermodynamic Analysis of Silica Refractory Corrosion in Glass-Melting Furnaces. *Journal of The Electrochemical Society*, 148(2), B59. <https://doi.org/10.1149/1.1337603>
- Bao, N., Miao, X., Hu, X., Zhang, Q., Jie, X., & Zheng, X. (2017). Novel synthesis of plasmonic Ag/AgCl@TiO<sub>2</sub> continues fibers with enhanced broadband photocatalytic performance. *Catalysts*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/catal7040117>

- Hamzah, M. S., Wildan, M. W., Kusmono, K., & Suharyadi, E. (2022). Synthesis of Silica Nanoparticles from Silica Sand via Vibration Assisted Alkaline Solution Method. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 35(7), 1300–1306. <https://doi.org/10.5829/ije.2022.35.07a.09>
- Hasri, Fauziah, & Negara, S. P. J. (2021). Sintesis Nanosilika Pasir Pantai Takalar Menggunakan Metode Hidrotermal. *Sainsmat: Jurnal Ilmiah Ilmu Pengetahuan Alam*, 10(2), 165. <https://doi.org/10.35580/sainsmat102262212021>
- Jenie, S. N. A., Ghaisani, A., Ningrum, Y. P., Kristiani, A., Aulia, F., & Petrus, H. T. M. B. (2018). Preparation of silica nanoparticles from geothermal sludge via sol-gel method. *AIP Conference Proceedings, 2026*, 1–6. <https://doi.org/10.1063/1.5064968>
- Munasir, Triwikantoro, Zainuri, M., & Darminto. (2013). Perbandingan Massa Kalium Hidroksida Pada Ekstraksi SiO<sub>2</sub> Orde Nano Berbasis Bahan Alam Pasir Kuarsa. *Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Pendidikan VII UKSW*.
- Pambudi, N. A., Itoi, R., Yamashiro, R., Alam, B. Y. C. S., Tusara, L., Jalilinasraby, S., & Khasani, J. (2015). The behavior of silica in geothermal brine from Dieng geothermal power plant, Indonesia. *Geothermics*, 54, 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.12.003>
- Pambudi, W., Sya'bani, M. W., Warmiati, & Ikhwan, M. (2022). Pengaruh Waktu Aging pada Sintesis Nano Particle Geothermal Silica (NPGS) Menggunakan Metode Sol-Presipitasi. *Jurnal Teknologi*, 10(1), 100–107.
- Rahim, N. A., Harun, N. Y., Saeed, A. A. H., & Bilad, M. R. (2023). Green Route Synthesis of Amorphous Silica from Oil Palm Decanter Cake: From Literature Review to Experiments. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 8(2), 141–156. <https://doi.org/10.17509/ijost.v8i2.53724>
- Rahmawati, C., Aprilia, S., Saidi, T., Aulia, T. B., & Hadi, A. E. (2021). The effects of nanosilica on mechanical properties and fracture toughness of geopolymer cement. *Polymers*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/polym13132178>
- Schweigert, I. V., Lehtinen, K. E. J., Carrier, M. J., & Zachariah, M. R. (2002). Structure and properties of silica nanoclusters at high temperatures. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 65(23), 2354101–2354109. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.235410>
- Silviana, Hasbi, R. M., Sagita, C. P., Nurhayati, O. D., Fauzan, A., Suhartana, & Hatmoko, J. U. D. (2017). Silika Alam dari Limbah Padatan Pengeboran Geotermal di Dieng Sebagai Silika Gel Melalui Proses Ramah Lingkungan. *Seminar Nasional Teknologi Industri Hijau 2*, 341–346.
- Singh, P., Srivastava, S., & Singh, S. K. (2019). Nanosilica: Recent Progress in Synthesis,



Functionalization, Biocompatibility, and Biomedical Applications [Review-article]. *ACS Biomaterials Science and Engineering*, 5(10), 4882–4898. <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.9b00464>

Sudhakaran, G., & Avirah, S. A. (2022). Studies on reinforcing effect of industrial nano silica in chloroprene vulcanizates containing carboxy-terminated liquid natural rubber. *Journal of Elastomers and Plastics*, 54(3), 509–517. <https://doi.org/10.1177/00952443211063597>

Suryadi, J., Sulaeman, S. A., Yulianthina, S., Paramitha, T., & Andrijanto, E. (2023). Karakter Ikatan Kimia, Kristalinitas, dan Ukuran Partikel Produk Silika yang Disintesis dari Bahan Limbah Padat Geotermal. *JC-T (Journal Cis-Trans): Jurnal Kimia Dan Terapannya*, 7(1), 10–15. <https://doi.org/10.17977/um0260v7i12023p010>

Utami, W. S., Herdianita, N., & Atmaja, R. (2014). The Effect of Temperature and pH on the Formation of Silica Scaling of Dieng Geothermal Field, Central Java, Indonesia. *Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.

Wahyudi, A., Dessy, A., & Sariman. (2013). Preparation of Nano Silica from Silica Sand Through Alkali Fusion. *Indonesian Mining Journal*, 16(3), 149–153.

Wahyudityo, R., Harto, A. W., & Suryopratomo, K. (2013). Analisis Scaling Silika pada Pipa Injeksi Brine di Lapangan Panas Bumi Dieng dengan Studi Kasus di PT. Geo Dipa Energi. *Teknofisika*, 2(1), 7–14.