

Analisis Ukuran Partikel Nanosilica pada Proses Alkali Fusion Silica Scaling Geotermal Dieng Menggunakan KOH

Fajar Fitriani¹, Muhammad Waziz Wildan¹, Riko Aulia Rachman¹

Universitas Muhammadiyah Jember

DOI: <https://xxxxxxxxxxxxxxxxxx>

*Correspondensi:

Muhammad Waziz Wildan

Email: 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: Salah satu karakteristik lapangan geotermal Dieng adalah tingginya kandungan silika pada fluida produksi yang menyebabkan munculnya silica scaling. Adanya silica scaling menghambat proses ekstraksi energi dan menjadi limbah yang mengganggu lingkungan. Silica scaling tersebut dapat dimanfaatkan menjadi produk nanosilica untuk digunakan sebagai reinforcing filler. Powder dengan ukuran nano diharapkan dapat meningkatkan mechanical properties suatu produk dengan hasil yang lebih dense. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis nanosilica dari silica scaling geotermal dengan metode alkali fusion. Nanosilica diperoleh dengan mereaksikan alkali KOH dengan silica scaling yang telah direduksi ukurannya menggunakan ball milling. Proses fusion dilakukan dengan heat treatment pada variasi suhu 400, 450, dan 500°C. Hasil fusion dilarutkan dalam aquades untuk dititrasi menggunakan HCl 2M dengan pengadukan menggunakan magnetic stirrer hingga terbentuk gelation yang dikeringkan menjadi nanoparticle silika. Karakterisasi ukuran serbuk nanosilica menggunakan Particle Size Analyzer

(PSA) mendapatkan data ukuran terkecil pada suhu fusion 400°C dengan ukuran yang cenderung bertambah seiring penambahan suhu fusion, di mana hasil tersebut sejalan dengan analisis gambar nanosilica dari pengujian Transmission Electron Microscopy (TEM) menggunakan software ImageJ. Analisis senyawa menggunakan Fourier Transform Infra-Red (FTIR) menunjukkan adanya ikatan karakteristik silika. Hasil X-Ray Diffraction (XRD) tidak menampakkan puncak tajam sehingga senyawa tersebut memiliki fasa amorf.

Kata Kunci: Silica Scaling, Alkali Fusion, Nanosilica

Abstrak: One of the characteristics of the Dieng geothermal field is the high silica content in the production fluid which causes the appearance of silica scaling. The presence of silica scaling inhibits the energy extraction process and becomes waste that disturbs the environment. The silica scaling can be utilized as a nanosilica product for use as a reinforcing filler. Nano-sized powder is expected to improve the mechanical properties of a product with denser results. This research aims to synthesize nanosilica from geothermal scaling silica using the alkali fusion method. Nanosilica is obtained by reacting alkali KOH with silica scaling which has been reduced in size using ball milling. The fusion process is carried out using heat treatment at varying temperatures of 400, 450 and 500°C. The fusion results were dissolved in distilled water for titration using 2M HCl with stirring using a magnetic stirrer until gelation was formed which was dried into silica nanoparticles. Characterization of the size of nanosilica powder using the Particle Size Analyzer (PSA) obtained the smallest size data at a fusion temperature of 400°C with the size tending to increase as the fusion temperature increased, where these results were in line with the analysis of nanosilica images from Transmission Electron Microscopy (TEM) testing using ImageJ software. Compound analysis using Fourier Transform Infra-Red (FTIR) shows the presence of characteristic silica bonds. The results of X-Ray Diffraction (XRD) do not show sharp peaks so the compound has an amorphous phase.

Keywords: Silica Scaling, Alkali Fusion, Nanosilica

PENDAHULUAN

Penelitian mengenai nanoteknologi merupakan salah satu bidang yang sedang aktif dilakukan karena tingkat kebaruan dan aplikasinya yang dapat terus berkembang. Nanopartikel merupakan salah satu produk kajian nanoteknologi di mana ukuran partikel yang didapatkan lebih kecil dari 1 mikron (Gupta, 2013). Nanopartikel berada dalam ukuran nanometer atau lebih tepatnya dalam rentang 1 hingga 100 nm (Yokoyama dkk., 2018). Partikel orde nano memiliki rasio area to volume yang lebih tinggi dibandingkan dengan orde mikro yang memberikan sifat permukaan yang lebih reaktif dibandingkan partikel dengan ukuran lebih besar (El-Didamony dkk., 2020). Nanosilika merupakan salah satu produk nanoteknologi yang bersumber dari bahan alam, salah satunya adalah limbah geotermal (Nurhapsari & Rizkia Putri Kusuma, 2018).

Energi bersih sebagai sumber power plant di Indonesia salah satunya didapatkan dari energi panas bumi. Penggunaan energi panas bumi menimbulkan suatu permasalahan dengan terdapatnya mineral ikutan berupa silica scaling pada fluida produksi. Banyaknya kandungan mineral ini mengganggu aktivitas ekstraksi energi karena menimbulkan endapan pada jalur produksi dan jalur penginjeksian kembali. Menurut (Wahyudityo dkk., 2013), fluida geothermal pada lapangan panas bumi Dieng memiliki kandungan silika sebesar ± 900 mg/L di mana kandungan tersebut akan mengendap menjadi silica scaling jika dialirkan ke permukaan bumi. Banyaknya kandungan silica scaling tersebut dapat menjadi limbah yang mengganggu lingkungan (Chitra et al., 2019).

Senyawa silika merupakan kandungan utama dari silica scaling. Analisis yang dilakukan oleh (Adiatama dkk., 2022) pada silica scaling menunjukkan kandungan silika yang besar yaitu 96,79 wt% dan sisanya merupakan senyawa pengotor. Mensintesis nanosilika dari silica scaling geotermal merupakan salah satu inovasi untuk meningkatkan nilai dari limbah silica scaling (Widati, 2021). Nanosilika telah banyak diaplikasikan di berbagai bidang seperti pada insulator, sensor, dan bidang biomedis seperti drug delivery dan material implant (Jenie dkk., 2018). Nanosilika dimanfaatkan oleh sebagai filler oleh (Rahman dkk., 2014) untuk meningkatkan kekerasan pada glass ionomer cement (GIC) sedangkan (Muh dkk., 2020) melakukan studi pada silika geotermal sebagai reinforcing filler pada artificial leather.

Penelitian ini menggunakan metode alkali fusion untuk mensintesis nanosilika dari limbah silica scaling. Proses sintesis tersebut dilakukan dengan mencampur silica scaling dan alkali KOH dengan heat treatment sehingga terjadi proses fusion. Komposisi yang digunakan sesuai dengan stokiometri serta dilakukan variasi suhu pada proses heat treatment. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui ukuran produk nanosilika dari hasil sintesis silica scaling geotermal dengan metode alkali fusion KOH pada variasi suhu 400, 450, dan 500°C serta karakteristiknya.

METODE

Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah *silica scaling* geotermal dari sumur produksi 30 PT Geo Dipa Energi Dieng. Alkali yang digunakan untuk proses *fusion* adalah KOH. Hasil *fusion* dilarutkan dengan aquades. Asam klorida (HCl) 2M digunakan

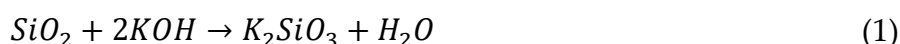
untuk proses titrasi pada pembentukan gelation nanosilika. Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu gelas beaker 500 ml dan 1000 ml, timbangan *scientific*, buret dan statif, oven, *magnetic stirrer*, penyaring, kertas Whatman, *sieve shaker*, *ultrasonic homogenizer*, dan *ball mill*. Instrumen karakterisasi yang digunakan anatara lain *Particle Size Analyzer* (PSA), *Transmission Electron Microscopy* (TEM), *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR), dan *X-Ray Diffraction* (XRD).

Pre-treatment sintesis nanosilika

Bulk material silica scaling dicuci dengan air untuk menghilangkan pengotor makro dan dikeringkan pada suhu 105°C selama 6 jam. *Silica scaling* direduksi ukurannya menjadi serbuk berukuran mikro menggunakan *ball mil* selama 1 jam dengan rasio bola dan serbuk sebesar 4:1. Serbuk *silica scaling* yang dihasilkan selanjutnya dihomogenkan ukurannya dengan metode *sieving* menggunakan *sieve shaker* pada ukuran lolos <105 µm (Shofiyani et al., 2020).

Sintesis nanosilika

Serbuk *silica scaling* dengan ukuran homogen dicampurkan dengan KOH dengan rasio wt% alkali dan serbuk sebesar 1,87:1. Proses *fusion* dilakukan dengan melakukan *heat treatment* pada campuran tersebut pada variasi suhu 400, 450, dan 500°C. Senyawa yang dihasilkan diwujudkan dalam Persamaan 1.



Senyawa potasium silikat (K_2SiO_3) yang didapatkan dilarutkan dalam aquades. Setelah didiamkan selama 24 jam, larutan tersebut disaring untuk memisahkan senyawa yang tidak bereaksi. Titrasi dilakukan pada larutan menggunakan HCl 2M dengan proses pengadukan menggunakan *magnetic stirrer* hingga didapatkan gel putih nanosilika ($\text{Si}(\text{OH})_4$). Dilakukan 5 kali pencucian pada gel nanosilika (NS) untuk menghilangkan KCl untuk kemudian dikeringkan pada suhu 105°C selama 12 jam. Mortar dan stamper dapat digunakan untuk menghancurkan serbuk nanosilika (NS) yang masih teraglomerasi.

Karakterisasi

Karakterisasi pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui ukuran partikel dan karakteristik senyawa yang dihasilkan. Beberapa karakterisasi yang dilakukan antara lain:

1. Analisis ukuran partikel menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) dengan memanfaatkan hamburan cahaya yang ditembakkan ke partikel nanosilika (NS). Spesimen yang diujikan dalam bentuk dispersi.
2. *Transmission Electron Microscopy* (TEM) untuk mengetahui ukuran partikel berdasarkan analisis gambar menggunakan *software ImageJ*.
3. Karakteristik ikatan kimia pada nanosilika hasil sintesis *silica scaling* menggunakan instrument *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR).
4. Kristalinitas nanosilika hasil sintesis *silica scaling* dengan metode difraksi x-ray menggunakan instrumen *X-Ray Diffraction* (XRD).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis nanosilika

Preparasi limbah *silica scaling* dilakukan dengan proses pencucian, pengeringan, reduksi ukuran, dan pengayakan. *Silica scaling* dicuci agar pengotor makro tidak tergerus dalam *ball mill* dan tercampur dengan serbuk. Pengeringan menggunakan oven Memmert 854 Schwabach digunakan untuk menghomogenkan parameter suhu dan waktu. *Silica scaling* harus dipastikan kering karena serbuk yang lembab cenderung akan menempel pada dinding *chamber ball mill*.

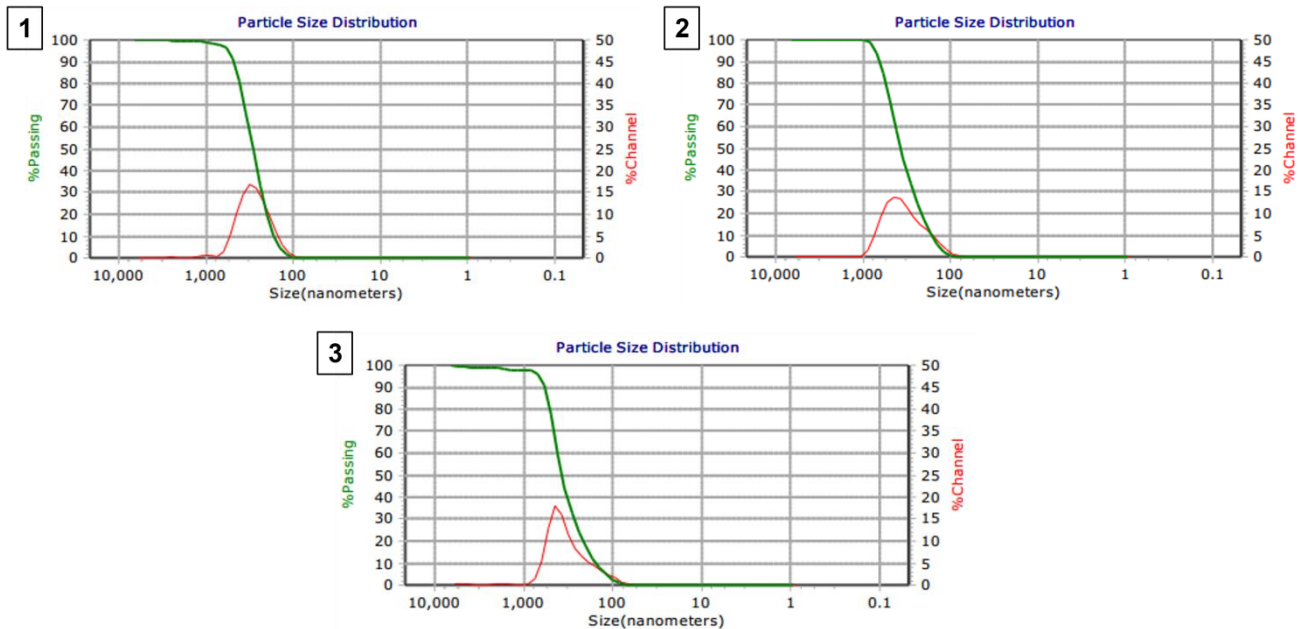
Proses reduksi ukuran limbah *silica scaling* dilakukan untuk mengubah *silica scaling* yang masih berbentuk *granule* menjadi serbuk dengan ukuran mikro. Proses reduksi ukuran dilakukan dengan *ball mill* di mana *silica scaling* bersama bola-bola keramik dimasukkan ke sebuah *chamber* berbahan keramik lalu diputar dengan sumbu putar horizontal. Tiga parameter yang dapat diaplikasikan yaitu *ball to powder weight ratio* (BPR), waktu *milling* dan kecepatan putar (rpm) (Sukanto dkk., 2019). *Ball mill* bekerja optimal ketika putaran *chamber* dapat mengangkat bola keramik mengikuti arah putaran yang kemudian jatuh menghantam serbuk. Proses reduksi ukuran partikel ini dilakukan untuk memperluas kontak area *silica scaling* sehingga lebih reaktif ketika direaksikan dengan KOH. Serbuk *silica scaling* hasil *ball mill* dihomogenkan ukurannya dengan proses *sieving* menggunakan *sieve shaker* yang terdiri dari ayakan bertingkat. Ayakan disusun dari atas ke bawah dengan ukuran mesh rendah ke tinggi dan ukuran lolos yang diambil adalah serbuk <105 μm .

Serbuk nanosilika disintesis dari *silica scaling* dengan ukuran mikro dengan metode *alkali fusion* menggunakan alkali KOH. Pencampuran serbuk dengan KOH yang disertai *heat treatment* pada variasi suhu 400°C, 450°C, dan 500°C menghasilkan padatan potasium silikat berwarna biru-kehijauan. Pemilihan komposisi dan suhu didasarkan pada perhitungan stokiometri dan diagram fasa untuk pembentukan potasium silikat sesuai kalkulasi pada (Allendorf dan Spear, 2015). Secara teori, seluruh variasi suhu yang digunakan dalam *heat treatment* juga memungkinkan pembentukan senyawa tersebut. Padatan tersebut dilarutkan dalam aquades dan didiamkan selama 24 jam. Potasium silikat akan larut dalam air sehingga senyawa dan pengotor yang tidak bereaksi akan mengendap atau mengapung. Setelah pengotor dipisahkan, larutan potasium silikat dititrasi menggunakan HCl 2M bersamaan dengan pengadukan menggunakan *magnetic stirrer* hingga terjadi gelation nanosilika. Nanosilika yang dihasilkan dari proses alkali fusion memiliki ukuran yang lebih homogen dan cenderung lebih tidak teraglomerasi dibandingkan dengan sintesis nanosilika secara mekanis menggunakan *milling* (Wahyudi dkk., 2017).

Pengujian ukuran serbuk

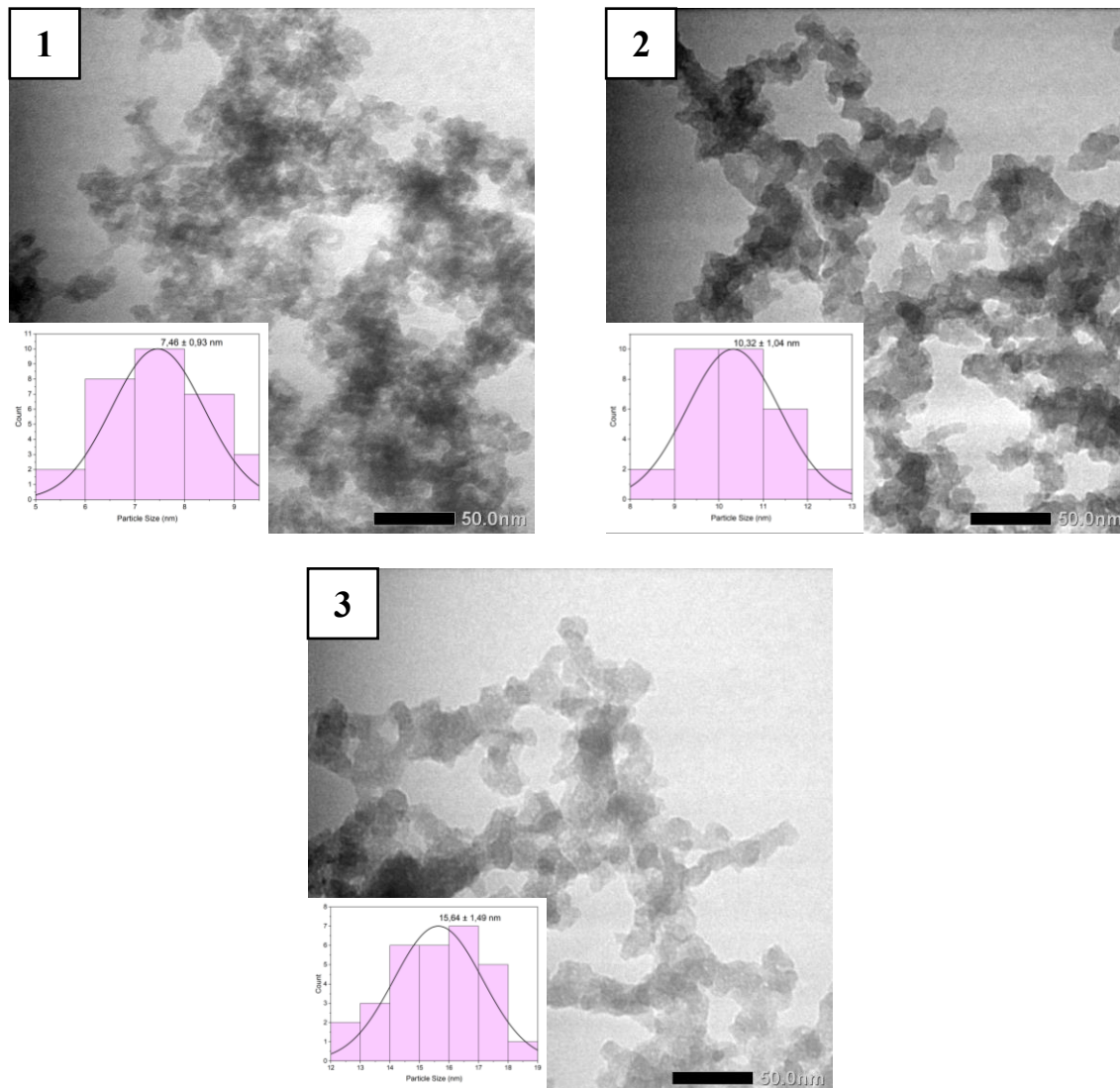
Ukuran partikel dengan orde nano dapat diketahui menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) dengan air sebagai medium dispersi. Preparasi pengujian dilakukan dengan melarutkan gel nanosilika dalam aquades. Larutan tersebut digetarkan menggunakan *ultrasonic homogenizer* untuk memecah aglomerasi partikel. Berdasarkan hasil uji PSA, didapatkan ukuran partikel sebesar 291,2 nm untuk suhu fusion 400°C, 367

nm untuk suhu fusion 450°C, dan 368 nm untuk suhu fusion 500°C. Ukuran partikel terkecil didapatkan pada suhu fusion 400°C dengan perbedaan ukuran yang tidak signifikan dibandingkan dengan variasi suhu lain. Dari pengujian PSA juga didapatkan ukuran nanosilika yang cenderung homogen untuk ketiga variasi suhu seperti yang ditunjukkan oleh grafik *particle size distribution* pada Gambar 1.



Gambar 1. Hasil pengujian PSA pada *gelation* nanosilika hasil sintesis *silica scaling* geotermal dengan fusion KOH pada suhu (1)400°C (2)450°C dan (3)500°C

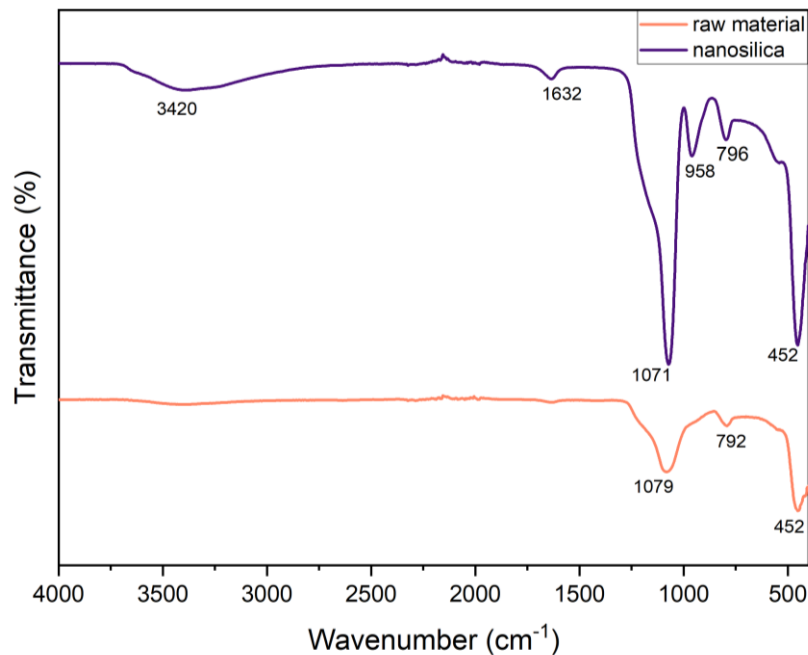
PSA dilakukan dengan memanfaatkan hamburan cahaya di mana terjadi fluktuasi gerakan yang memberikan data pergerakan hamburan karena gerak Brownian (Adhikari, 2021). Ukuran partikel yang didapatkan cenderung besar karena partikel yang diuji dalam medium dispersi air dapat menyebabkan terjadinya aglomerasi. Dengan pengujian metode ini, peluang partikel-partikel kecil menyatu sangat besar (Munasir dkk., 2012). Pengujian pengukuran divalidasi menggunakan instrumen *Transmission Electron Microscopy* (TEM) di mana hasil yang didapatkan berupa gambar dengan perbesaran skala 50 nm. Gambar TEM partikel nanosilika diwujudkan pada Gambar 2(a), 2(b), dan 2(c). Partikel dapat dianalisis ukurannya dengan *software* ImageJ menggunakan perbandingan ukuran partikel nanosilika dengan ukuran skala.



Gambar 2. Hasil analisis uji TEM pada gelation nanosilika hasil sintesis *silica scaling* geothermal fusion KOH pada suhu (1)400°C (2)450°C dan (3)500°C

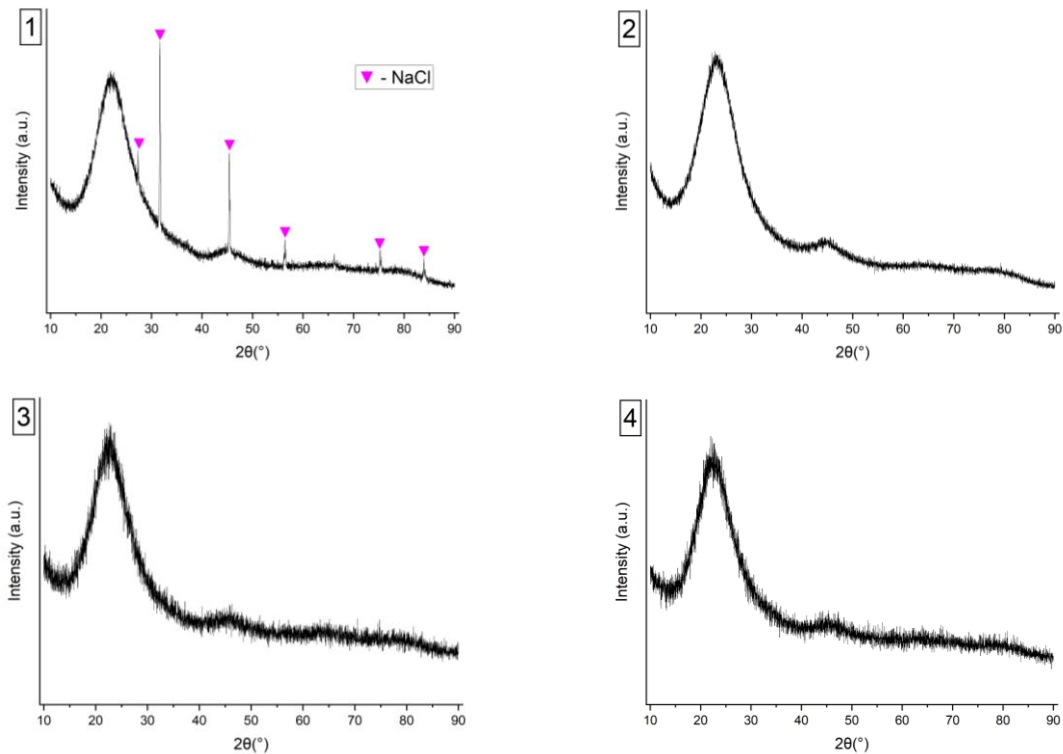
Hasil analisis ukuran partikel menggunakan TEM juga memvalidasi bahwa terdapat aglomerasi. Analisis ukuran dilakukan pada partikel yang tidak teraglomerasi menggunakan *software* ImageJ. Hasil sintesis *silica scaling* pada suhu *fusion* 400°C mendapatkan partikel dengan ukuran terkecil yaitu $7,46 \pm 0,93$ nm. Proses *fusion* dengan suhu 450°C mendapatkan partikel dengan ukuran $10,32 \pm 1,04$ nm sedangkan pada suhu 500°C didapatkan ukuran $15,64 \pm 1,49$ nm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses *alkali fusion* dengan *heat treatment* pada variasi suhu 400°C, 450°C, maupun 500°C dapat menghasilkan produk nanosilika karena ukuran yang didapatkan dari ketiga variasi berada pada rentang 1-100 nm (Yokoyama dkk., 2018).

Karakterisasi nanosilika



Gambar 3. Spektra FTIR pada *raw material silica scaling* dan produk nanosilika hasil sintesis *silica scaling* geotermal dengan alkali fusion KOH

Hasil karakterisasi *raw material silica scaling* dan produk nanosilika menggunakan instrument *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR) ditunjukkan oleh Gambar 3. FTIR digunakan untuk melihat ikatan karakteristik silika yang terjadi pada produk nanosilika (Suryadi dkk., 2023). Bilangan gelombang 792 cm⁻¹ untuk *raw material* dan 796 cm⁻¹ untuk nanosilika menunjukkan gugus fungsi vibrasi regangan simetris Si-O pada Si-O-Si sedangkan vibrasi asimetris Si-O pada Si-O-Si terdapat pada bilangan gelombang 1079 cm⁻¹ dan 1071 cm⁻¹ untuk *raw material* dan nanosilika (Rampe dkk., 2023). Jenis gugus fungsi vibrasi *bending* O-Si-O terdapat pada bilangan gelombang 452 cm⁻¹ untuk *raw material* maupun nanosilika. Pada nanosilika terdapat puncak pada bilangan gelombang 958 cm⁻¹ di mana pada rentang 949-966 cm⁻¹ merupakan vibrasi regangan asimetris Si-O pada Si-OH (Mujiyanti dkk., 2021). Spektra 1632 cm⁻¹ juga menunjukkan adanya vibrasi *bending* -OH pada gugus silanol (Si-OH) di mana gugus ini memberikan sifat *hydrophilic* pada nanosilika (Silviana dkk., 2020). Nanosilika juga menunjukkan adanya puncak pada bilangan gelombang 3420 cm⁻¹ yang merupakan puncak gugus hidroksil -OH pada Si-OH. Adanya gugus-gugus tersebut menunjukkan bahwa karakteristik ikatan yang terbentuk diidentifikasi sebagai ikatan senyawa silika.



Gambar 4. Hasil pengujian XRD pada (1) *raw material silica scaling* dan produk nanosilika hasil sintesis *silica scaling* geotermal fusi KOH pada suhu (2)400°C (3)450°C dan (4)500°C

Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk mengetahui sifat kristalinitas *raw material limbah silica scaling* dan produk nanosilika seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4. Secara garis besar, pola difraksi pada keempat gambar menunjukkan puncak yang tidak tajam dengan nilai 2θ pada rentang 15° sampai 35° dengan puncak tertinggi pada 24° . Bentuk puncak difraksi memiliki kemiripan dengan hasil riset oleh (Munasir dkk., 2012) yang menunjukkan bahwa senyawa tersebut merupakan silika amorf. Hasil pola difraksi *raw material* pada Gambar 4(1) menunjukkan adanya puncak-puncak tajam dengan nilai 2θ pada $27,34^\circ$; $31,67^\circ$; $45,41^\circ$; $56,44^\circ$; $75,28^\circ$; dan $83,96^\circ$. Pola difraksi tersebut kemudian dianalisis menggunakan data JCPDS dalam (Abdou dan Moharam, 2019) dan nilainya sesuai dengan karakteristik pola difraksi NaCl. Senyawa NaCl ini tidak ditemukan dalam produk nanosilika dengan tidak adanya puncak-puncak tajam pada Gambar 4(2), 4(3), dan 4(4).

SIMPULAN

Berdasarkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan di PT. Biro Teknik Sinar Baru berjudul “Eksplorasi Energi Biogas di PT. Biro Teknik Sinar Baru” dapat disimpulkan bahwa biogas lebih efisien dari LPG sebagai bahan bakar kompor dilihat dari parameter durasi, dan volume penggunaan. Emisi gas buang CO yang dihasilkan lebih sedikit daripada gas LPG setelah dilakukan pengukuran. Adapun saran penelitian untuk penelitian selanjutnya adalah perlu ditambah alat monitoring untuk mengetahui biogas yang dihasilkan secara kontinue dan online.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdou, S. M., & Moharam, H. (2019). Characterization of table salt samples from different origins and ESR detection of the induced effects due to gamma irradiation. *Journal of Physics: Conference Series*, 1253(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1253/1/012036>
- Adhikari, T. (2021). Nanotechnology in Environmental Soil Science. *Soil Science: Fundamentals to Recent Advances*, February, 297–310. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0917-6_14
- Adiatama, A. R., Susanti, R. F., Astuti, W., Petrus, H. T. B. M., & Wanta, K. C. (2022). SYNTHESIS AND CHARACTERISTIC OF NANO SILICA FROM GEOTHERMAL SLUDGE: EFFECT OF SURFACTANT. *Metalurgi*, 2, 73–86.
- Allendorf, M. D., & Spear, K. E. (2015). Thermodynamic Analysis of Silica Refractory Corrosion in Glass-Melting Furnaces Thermodynamic Analysis of Silica Refractory Corrosion in Glass-Melting Furnaces. January 2001. <https://doi.org/10.1149/1.1337603>
- Chitra, F., Shofiyani, A., Rahmalia, W., & Alimuddin, A. H. (2019). Sintesis Nanosilika dari Batu Padas untuk Penurunan Karbon Organik Total Dari Limbah Industri Sawit. *Jurnal Ilmu Dasar*, 20(1), 39–46.
- El-Didamony, H., El-Fadaly, E., Amer, A. A., & Abazeed, I. H. (2020). Synthesis and characterization of low cost nanosilica from sodium silicate solution and their applications in ceramic engobes. *Boletin de La Sociedad Espanola de Ceramica y Vidrio*, 59(1), 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2019.06.004>
- Gupta, S. (2013). Application of Silica Fume and Nanosilica in Cement and Concrete – A Review. *Journal on Today's Ideas - Tomorrow's Technologies*, 1(2), 85–98. <https://doi.org/10.15415/jotitt.2013.12006>
- 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>
- Muh, W. S., Ina, A., Indri, H., & Yayat, I. S. (2020). Silica from geothermal waste as reinforcing filler in artificial leather. *Key Engineering Materials*, 849 KEM(June), 78–83. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.849.78>
- Mujiyanti, D. R., Ariyani, D., & Lisa, M. (2021). Indonesian Journal of Chemical Research Silica Content Analysis of Siam Unus Rice Husks from South Kalimantan. *J. Chem. Res*, 9(2), 81–87. <https://doi.org/10.30598//ijcr.2021.9-muj>
- Munasir, Widodo, Triwikantoro, Zainuri, M., & Darminto. (2012). Perbandingan Massa Kalium Hidroksida Pada Ekstraksi SiO₂ Orde Nano Berbasis Bahan Alam Pasir Kuarsa. *Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Pendidikan Sains VII UKSW*, 40–44.

- Nurhapsari, A., & Rizkia Putri Kusuma, A. (2018). Penyerapan Air dan Kelarutan Resin Komposit Tipe Microhybrid, Nanohybrid, Packable dalam Cairan Asam. *ODONTO Dental Journal*, 5(1), 67–75.
- Rahman, I. A. B., Masudi, S. M., Luddin, N., & Shiekh, R. A. (2014). One-pot synthesis of hydroxyapatite-silica nanopowder composite for hardness enhancement of glass ionomer cement (GIC). *Bulletin of Materials Science*, 37(2), 213–219. <https://doi.org/10.1007/s12034-014-0648-3>
- Rampe, M. J., Lombok, J. Z., Tiwow, V. A., Tengker, S. M. T., & Bua, J. (2023). CHARACTERIZATION OF SILICA (SiO₂) BASED ON BEACH SAND FROM SULAWESI AND SUMATRA AS SILICON CARBIDE (SiC) BASE MATERIAL. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 58(3), 467–476.
- Shofiyani, A., Rahmiyati, Y., Zaharah, A., Kimia, J., Mipa, F., & Tanjungpura, U. (2020). Nanosilika Berbahan Dasar Batu Padas Sebagai Adsorben Zat Warna Sintetis Rhodamin B. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 9(3), 188–193.
- Silviana, S., Sanyoto, G. J., Darmawan, A., & Sutanto, H. (2020). Geothermal silica waste as sustainable amorphous silica source for the synthesis of silica xerogels. *Rasayan Journal of Chemistry*, 13(3), 1692–1700. <https://doi.org/10.31788/RJC.2020.1335701>
- Sukanto, Soenoko, R., Suprpto, W., & Irawan, Y. S. (2019). Parameter Optimization of Ball Milling Process for Silica Sand Tailing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 494(1), 0–10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/494/1/012073>
- 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>
- Wahyudi, A., Technology, C., & Amalia, D. (2017). Preparation of Nano Silica from Silica Sand Through Alkali Fusion PREPARATION of NANO SILICA FROM SILICA SAND THROUGH ALKALI FUSION PROCESS. October 2013.
- 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.
- Widati, A. A. (2021). Greensphere : Journal of Environmental Chemistry. *Greensphere*, 1(1), 25–30.
- Yokoyama, T., Masuda, H., Suzuki, M., Ehara, K., Nogi, K., Fuji, M., Fukui, T., Suzuki, H., Tatami, J., Hayashi, K., & Toda, K. (2018). Basic Properties and Measuring Methods of Nanoparticles. In *Nanoparticle Technology Handbook*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64110-6.00001-9>