



TRANSFORMASI LIMBAH GEOTERMAL MENJADI SUMBER SILIKA: TINJUAN POTENSI APLIKASI INDUSTRI

Rama Khadafi^{1*}, Tumpal Ojahan R²

^{1,2}Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Malahayati, Lampung.

Corresponden Email : tumpal_ojahan@yahoo.com²

Abstract

Indonesia's vast geothermal potential (23.7 GW, 40% of global reserves) faces operational challenges from silica scaling amorphous SiO₂ deposition in pipelines and equipment. This review repositions scaling from a waste problem to a strategic resource, leveraging its high silica content (88–97%), amorphous structure, and unique morphology. Through systematic literature analysis, we identify two key scaling formation pathways (heterogeneous botryoidal layers and homogeneous 3D aggregates) influenced by temperature, pH, and flow dynamics. Silica scaling exhibits high surface area (up to 50 m²/g) and mesoporosity (2–50 nm), enabling extraction via alkali-acid processing into functional materials. Impurities (Fe, Al, Ca) are transformed into value-added components for catalysts, geopolymers, and composites. We map industrial applications adsorbents, ceramic fillers, and nanostructured materials based on material properties and local scalability. This circular economy approach reduces operational costs while creating new revenue streams. Key barriers include standardization gaps and supply chain integration, necessitating industry-geothermal sector collaboration for sustainable implementation in Indonesia.

Keywords: *silica scaling, geothermal waste valorization, amorphous silica, circular economy, industrial applications, Indonesia.*

Abstrak

Potensi geothermal Indonesia yang besar (23,7 GW, 40% cadangan dunia) menghadapi tantangan operasional akibat *silica scaling* pengendapan SiO₂ amorf pada pipa dan peralatan. Kajian ini mentransformasi *scaling* dari limbah masalah menjadi sumber daya strategis, memanfaatkan kandungan silika tinggi (88–97%), struktur amorf, dan morfologi uniknya. Melalui analisis literatur sistematis, kami mengidentifikasi dua jalur pembentukan *scaling* (*heterogen* lapisan botrioidal dan *homogen* agregat 3D) yang dipengaruhi suhu, pH, dan dinamika aliran. *Silica scaling* menunjukkan luas permukaan tinggi (hingga 50 m²/g) dan mesoporositas (2–50 nm), memungkinkan ekstraksi melalui proses alkali-asam menjadi material fungsional. Pengotor (Fe, Al, Ca) dikonversi menjadi *komponen bernilai tambah* untuk katalis, geopolimer, dan komposit. Kami memetakan aplikasi industri adsorben, *filler* keramik, dan material termaju berdasarkan sifat material dan skalabilitas lokal. Pendekatan ekonomi sirkular ini mengurangi biaya operasional sekaligus menciptakan aliran pendapatan baru. Hambatan utama mencakup kesenjangan standarisasi dan integrasi rantai pasok, yang memerlukan kolaborasi industri-sektor geothermal untuk implementasi berkelanjutan di Indonesia.

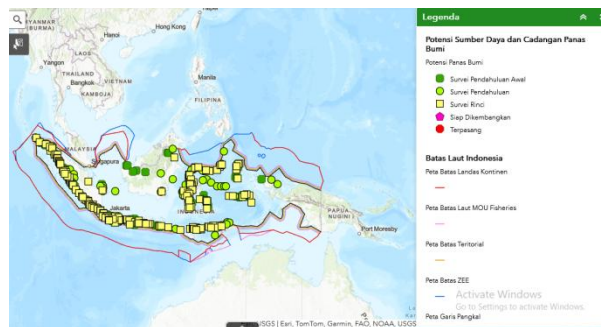
Kata Kunci: *silica scaling, valorisasi limbah geothermal, silika amorf, ekonomi sirkular, aplikasi industri, Indonesia.*

PENDAHULUAN

Indonesia terletak di kawasan *ring of fire*, yang dikenal sebagai daerah yang memiliki banyak gunung berapi dan rawan bencana alam. Meskipun demikian, kawasan ini juga menyimpan potensi energi *geothermal* yang sangat besar. Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) pada tahun 2020, potensi cadangan *geothermal* Indonesia diperkirakan mencapai 23,7 GW, atau setara dengan 40% cadangan dunia (ESDM, 2020). Potensi cadangan *geothermal* tersebut sebagaimana terlihat pada gambar 1, tersebar di seluruh pulau-pulau di Indonesia (ESDM, 2025). Hal ini memberikan peluang besar untuk pengembangan energi terbarukan yang dapat

mendukung kebutuhan energi nasional serta mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi fosil yang merata di berbagai daerah di Indonesia.

Kontribusi pembangkit listrik berbasis *geothermal* dalam transisi menuju energi bersih sangat penting, terutama dalam mencapai target *Net Zero Emission* (NZE) pada tahun 2060. Sebagai sumber energi yang ramah lingkungan, *geothermal* dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan menurunkan emisi gas rumah kaca. Dalam upaya mendukung transisi energi ini, Indonesia harus meningkatkan investasi dan pengembangan teknologi *geothermal*, sehingga dapat memaksimalkan pemanfaatan sumber daya yang ada untuk menghasilkan energi yang bersih dan berkelanjutan



Gambar 1. Sebaran Potensi Sumber Daya dan Cadangan Panas Bumi di Indonesia
(ESDM *One Map*, 2025)

Dibalik besarnya potensi *geothermal* sebagai sumber energi pembangkit listrik terdapat permasalahan operasional yang dihadapi oleh pembangkit listrik berbasis *geothermal*. Salah satu masalah utama yang muncul adalah *silica scaling*. *Silica scaling* pada pembangkit listrik berbasis *geothermal* adalah terjadinya pengendapan padatan silika (SiO_2) pada peralatan pembangkit listrik seperti pipa, separator, turbin, dan injector seperti yang terlihat pada gambar 2. Ini terjadi karena perubahan kondisi fluida panas bumi saat diekstraksi dari reservoir ke permukaan. *Silica scaling* memicu dampak negatif multidimensi meliputi aspek teknis, ekonomi, dan operasional. Deposit silika yang mengendap pada pipa dan *heat exchanger* menyebabkan penyumbatan aliran fluida dan penurunan laju produksi uap. Pada turbin, akumulasi silika mengurangi efisiensi konversi energi melalui gangguan profil aliran dan peningkatan *surface roughness*. Secara finansial, biaya mitigasi seperti pembersihan kimiawi (*chemical cleaning*) atau mekanis (*mechanical removal*) membebani biaya operasional, sementara *downtime* yang diinduksi *scaling* mengganggu stabilitas pasokan listrik dan pendapatan operasional.

Meskipun *silica scaling* dianggap sebagai permasalahan operasional, sisi lain dari fenomena ini justru menyimpan potensi material yang belum banyak dimanfaatkan. Beberapa studi menunjukkan bahwa material *scaling* ini memiliki kandungan silika sangat tinggi, yaitu antara 88,45% hingga 96,79% dengan bentuk amorf yang serupa dengan silika komersial (Adiatama *et al.*, 2022; Silviana *et al.*, 2017). Hal ini membuka peluang untuk merekonstruksi cara pandang terhadap *silica scaling*, dari yang semula sebagai limbah menjadi sumber daya alternatif berharga.



Gambar 2. Silica scaling di Dieng geothermal plant (Rahman *et al.*, 2023).

Silika merupakan material multifungsi yang banyak digunakan dalam industri kaca, keramik, bahan penguat komposit, adsorben, hingga biomedical. Karakteristik unik dari silika geotermal seperti ukuran partikel yang halus, morfologi spesifik, dan kemurnian tinggi menjadikannya kandidat ideal untuk aplikasi lanjutan, termasuk sebagai bahan baku *nanostructured materials*. Dalam kerangka *circular economy*, pemanfaatan limbah *geothermal* menjadi material bernilai tambah juga selaras dengan prinsip *zero waste* dan efisiensi sumber daya, serta dapat memperluas portofolio manfaat dari sektor energi panas bumi.

Namun, hingga saat ini, pemanfaatan silika dari limbah *geothermal* masih sangat terbatas, baik dari sisi teknologi pemrosesan maupun integrasi dengan rantai pasok industri material. Belum adanya standar karakterisasi, minimnya data lokal, serta rendahnya keterlibatan industri hilir menjadi hambatan utama dalam realisasi pemanfaatan ini. Oleh karena itu, dibutuhkan kajian yang menyeluruh untuk mengeksplorasi potensi transformasi limbah *geothermal* menjadi sumber silika yang aplikatif bagi industri, khususnya di Indonesia.

Makalah ini bertujuan untuk meninjau potensi pemanfaatan *silica scaling* dari pembangkit listrik berbasis *geothermal* sebagai bahan baku industri yang berkelanjutan. Melalui penelusuran literatur, identifikasi sifat fisikokimia material, dan eksplorasi kemungkinan aplikasinya dalam berbagai sektor, kajian ini diharapkan dapat membuka wawasan baru dalam pengelolaan limbah *geothermal* yang tidak hanya mengurangi dampak teknis, tetapi juga meningkatkan nilai ekonominya.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini adalah sebuah kajian menyeluruh yang berlandaskan tinjauan pustaka, yang menggabungkan tiga pendekatan utama, yaitu:

1. Tinjauan Sistematis untuk mengidentifikasi pola pembentukan pengendapan silika dan teknologi penggunaannya.
2. Analisis Deskriptif-Eksplanatif yang menghubungkan karakteristik material dengan potensi aplikasinya dalam industri.
3. Evaluasi Komparatif yang membandingkan kinerja silika geothermal dengan silika konvensional.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Menimbang urgensi pemanfaatan limbah *geothermal* sebagai sumber daya strategis, khususnya dalam konteks transisi energi dan ekonomi sirkular, pembahasan ini diarahkan untuk mengurai tiga aspek utama secara sistematis. Pertama, perlu dipahami terlebih dahulu bagaimana *silica scaling* terbentuk di lingkungan *geothermal*, serta seperti apa karakteristik fisika-kimia yang dimilikinya—karena hal ini sangat menentukan jalur transformasi yang dapat ditempuh. Kedua, akan dibahas berbagai metode ekstraksi dan rekayasa material yang telah dikembangkan untuk mengonversi silika dari limbah menjadi bentuk yang bernilai guna tinggi. Ketiga, dengan mengacu pada sifat material hasil transformasi, dilakukan pemetaan potensi aplikatif yang relevan dengan kebutuhan industri dan peluang pengembangan lokal.

Dengan pendekatan ini, diharapkan pembahasan tidak hanya memberikan gambaran menyeluruh mengenai potensi teknis *silica scaling*, tetapi juga membuka ruang bagi arah riset lanjutan dan integrasi ke dalam sistem produksi berkelanjutan.

PROSES GEOKIMIA PEMBENTUKAN SILICA SCALING

Silica scaling adalah endapan silika (SiO_2) yang terbentuk pada permukaan peralatan, terutama pada sistem pembangkit listrik berbasis *geothermal* yang disebabkan oleh perubahan kondisi fisikokimia fluida *geothermal*. Proses geokimia yang terlibat dalam pembentukan *silica scaling* meliputi beberapa tahapan dan kondisi yang kompleks, diantaranya:

1. Penurunan suhu (*cooling*)

Ketika fluida panas bumi yang mengandung silika dalam kondisi jenuh di bawah permukaan tanah diangkat ke atas, terjadi perubahan suhu yang cukup drastis. Penurunan suhu ini berpengaruh pada kelarutan silika, yang akan berkurang pada suhu yang lebih rendah. Akibatnya, silika yang sebelumnya berada dalam keadaan terlarut mulai mengendap dan membentuk silika amorf, yaitu bentuk silika yang tidak memiliki struktur kristalin yang teratur (Permana *et al.*, 2017). Proses ini merupakan bagian penting dari dinamika *geothermal*, di mana perubahan suhu dan tekanan dapat mempengaruhi komposisi mineral yang terbentuk. Ketika fluida panas bumi mengalami penurunan suhu saat mencapai permukaan, silika yang larut dalam fluida tersebut tidak lagi dapat dipertahankan dalam bentuk terlarut, hal ini menyebabkan silika mulai mengendap, dan seiring waktu, dapat membentuk lapisan-lapisan silika amorf yang dapat terlihat di permukaan (Kashpura and Potapov., 2000; Herianto *et al.*, 2020). Fenomena ini tidak hanya memiliki implikasi terhadap pembentukan mineral, tetapi juga dapat berpengaruh pada sistem geothermal secara keseluruhan, termasuk potensi energi yang dapat dieksploitasi serta dampaknya terhadap lingkungan sekitar. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam mengenai proses ini sangatlah penting dalam penelitian dan pengembangan sumber daya geothermal.

2. *Flashing*

Flashing merupakan suatu proses yang terjadi ketika tekanan dalam suatu sistem mengalami penurunan secara tiba-tiba, yang mengakibatkan sebagian dari air dalam sistem tersebut bertransformasi menjadi uap. Proses ini memiliki dampak signifikan terhadap konsentrasi silika yang terdapat di dalam larutan. Ketika sebagian air menguap, konsentrasi silika dalam larutan tersebut meningkat, sehingga menciptakan kondisi di mana larutan menjadi supersaturasi terhadap silika. Dengan kata lain, kondisi supersaturasi ini menunjukkan bahwa jumlah silika yang terlarut dalam larutan melebihi batas solubility-nya, yang dapat memicu berbagai reaksi kimia dan fisik yang penting dalam konteks industri dan penelitian (Permana *et al.*, 2017; Herianto *et al.*, 2020; Ciptadi dan Patangke., 2001).

3. Perubahan pH

Kenaikan nilai pH yang terjadi setelah proses flashing dapat menjadi faktor penyebab terjadinya pembentukan scaling. Ketika pH berada di atas angka 8, terdapat peningkatan potensi untuk terjadinya pengendapan silika. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa pada kondisi pH yang lebih tinggi, silika cenderung lebih mudah untuk membentuk polimer. Proses ini pada akhirnya dapat berujung pada pengendapan silika dalam bentuk scale. Oleh karena itu, pengendalian nilai pH menjadi sangat krusial dalam upaya untuk mengendalikan terjadinya scaling akibat silika. Pentingnya pengelolaan pH ini tidak dapat diabaikan, karena berpengaruh langsung terhadap efektivitas pengendalian scaling yang dapat terjadi dalam system (Permana *et al.*, 2017).

4. Polimerisasi dan Presipitasi

Proses kimia yang menjadi fokus utama adalah polimerisasi dari monomer silika, yang secara kimiawi dikenal sebagai $\text{Si}(\text{OH})_4$. Proses ini menghasilkan bentuk polimer yang pada akhirnya berkontribusi pada pembentukan partikel silika amorf. Pengendapan partikel silika ini dipicu oleh sejumlah kondisi yang sangat spesifik, termasuk keadaan supersaturasi, suhu yang relatif rendah, laju pendinginan yang cepat, serta tingkat polimerisasi yang tinggi yang terjadi pada rentang pH netral hingga sedikit basa (Pardelli *et al.*, 2021). Dalam konteks ini, supersaturasi merujuk pada kondisi di mana larutan mengandung lebih banyak zat terlarut dibandingkan dengan jumlah yang dapat larut pada suhu dan tekanan tertentu. Ketika kondisi ini tercapai, partikel silika mulai terbentuk melalui proses polimerisasi, di mana molekul-molekul monomer silika bergabung untuk membentuk struktur yang lebih besar dan kompleks. Suhu rendah dan laju pendinginan yang cepat berfungsi untuk mempercepat proses ini, mencegah pertumbuhan kristal yang lebih besar, dan mendukung pembentukan partikel amorf yang diinginkan (Al Saadi and Al Haddabi, 2019).

5. Faktor-Faktor Lain yang Perlu Dipertimbangkan

- **Konsentrasi Silika Terlarut:** Tingkat kandungan silika yang terdapat dalam brine memiliki pengaruh yang signifikan terhadap potensi terjadinya scaling. Semakin tinggi konsentrasi silika,

semakin besar kemungkinan terjadinya penumpukan mineral yang dapat mengganggu proses (Wahyudityo *et al.*, 2013).

- Laju Aliran Fluida: Debit aliran dan tingkat turbulensi dari fluida juga berperan penting dalam menentukan lokasi serta intensitas penebalan scale. Variasi dalam laju aliran dapat menyebabkan perubahan dalam pola distribusi dan akumulasi scaling (Syam *et al.*, 2021).
- Ion-Ion Lain: Kehadiran ion logam lainnya, seperti ion kalsium (Ca^{2+}) atau ion magnesium (Mg^{2+}), dapat berinteraksi dengan silika dan berkontribusi pada pembentukan jenis scaling yang berbeda. Contohnya, pada kondisi pH yang tinggi, dapat terbentuk magnesium silikat yang merupakan salah satu bentuk scaling yang perlu diperhatikan (Al Saadi and Al Haddabi, 2019).

Dengan mempertimbangkan faktor-faktor ini, kita dapat lebih memahami dinamika yang terlibat dalam proses scaling dan mengambil langkah-langkah yang diperlukan untuk mengelola dan meminimalkan dampaknya.

6. Reaksi Geokimia yang Terjadi di Permukaan

Silika dapat larut terutama dalam bentuk asam silikat, yang dikenal sebagai monomer $\text{Si}(\text{OH})_4$. Proses ini dapat dipengaruhi oleh perubahan kondisi lingkungan, seperti variasi tekanan, suhu, dan pH. Dalam situasi seperti ini, reaksi kimia yang terjadi dapat berlangsung secara bertahap. Sebagai contoh, reaksi yang mungkin terjadi adalah sebagai berikut:



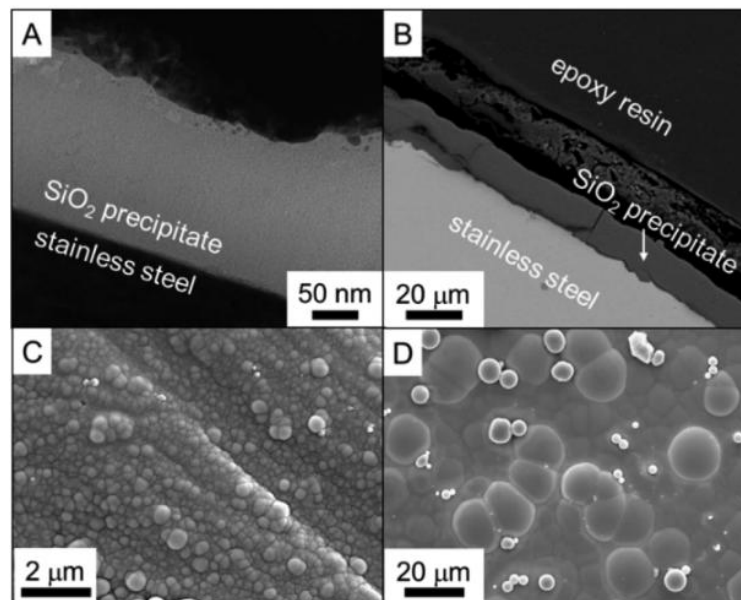
Reaksi ini menunjukkan bahwa asam silikat dapat terurai menjadi silika amorf dan air. Proses ini tidak hanya merupakan reaksi sederhana, tetapi juga diperkuat oleh fenomena kejenuhan dan polimerisasi dari asam silikat itu sendiri. Ketika asam silikat mengalami polimerisasi, ia akan membentuk gel silika, yang dalam tahap selanjutnya dapat mengeras dan membentuk suatu lapisan yang dikenal sebagai kerak. Proses ini sangat penting dalam konteks geokimia, karena memberikan kontribusi pada pembentukan struktur dan komposisi permukaan tanah serta mineral yang ada di dalamnya (Pardelli *et al.*, 2021).

MORFOLOGI DAN STRUKTUR MATERIAL *SILICA SCALING* : DINAMIKA PEMBENTUKAN DAN IMPLIKASINYA

Morfologi serta struktur dari material *silica scaling* memiliki ciri-ciri yang unik dan sangat penting untuk dipahami, terutama dalam konteks pembentukan serta pengendalian fenomena *scaling* tersebut. Hal ini menjadi semakin relevan ketika kita membahas aplikasi dan pengelolaan sistem *geothermal*. Pemahaman yang mendalam mengenai karakteristik ini tidak hanya akan membantu dalam mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan *scaling*, tetapi juga dalam merumuskan strategi yang efektif untuk mengendalikannya.

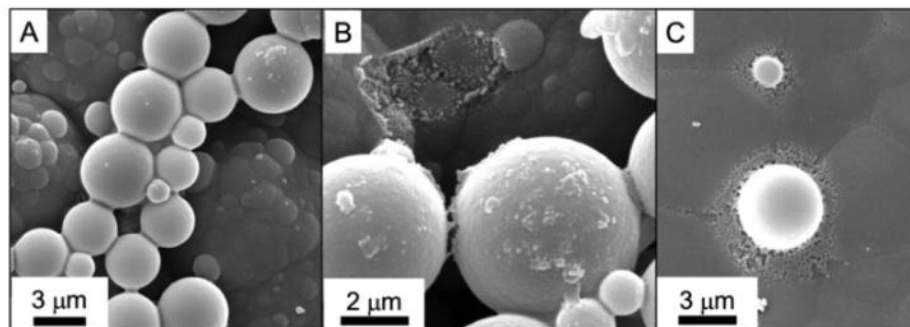
Studi morfologi menggunakan teknik *Scanning Electron Microscopy (SEM)* menunjukkan bahwa *silica scaling* dari berbagai lapangan *geothermal* di Indonesia, belum ada yang melakukan

kajian secara lebih mendalam. Namun demikian kita bisa mencari referensi pembentukan *silica scaling* di pusat geothermal di luar Indonesia, seperti penelitian yang dilakukan oleh beberapa peneliti di pusat geothermal di *the Hellisheiði geothermal power plant (SW-Iceland)*, yang mengungkap pembentukan *silica scaling*. Berdasarkan hasil FESEM sebagaimana terlihat pada gambar 3, menunjukkan perkembangan morfologi dan struktur lapisan presipitasi silika yang terbentuk pada pelat stainless steel dalam sistem geothermal selama waktu paparan yang berbeda. Panel A memperlihatkan citra TEM dari penampang melintang lapisan presipitasi setelah 1 hari, yang menunjukkan lapisan amorf silika tipis (~300 nm) dengan permukaan yang halus dan padat. Ini menandakan tahap awal pertumbuhan yang dikendalikan oleh nukleasi heterogen di permukaan logam. Setelah 10 minggu paparan (Panel B), citra FEG-SEM menunjukkan pertumbuhan lapisan silika yang jauh lebih tebal, mencapai lebih dari 20 µm. Lapisan tersebut terbentuk secara kontinu dan menunjukkan struktur padat yang terikat kuat pada substrat stainless steel. Hal ini mencerminkan akumulasi progresif material silika yang berasal dari larutan supersaturasi, seiring dengan berlangsungnya presipitasi dalam sistem tertutup. Perubahan juga tampak jelas pada morfologi permukaan. Setelah 1 hari (Panel C), permukaan menunjukkan tekstur botrioidal yang terdiri dari partikel-partikel hemisferal kecil berukuran nano hingga submikron. Pertumbuhan ini merupakan ciri khas presipitasi awal melalui penambahan monomer silika langsung ke permukaan padat. Namun, setelah 10 minggu (Panel D), permukaan menunjukkan agregat hemisferal besar berukuran hingga >10 µm yang menyatu membentuk struktur kasar dan menonjol. Ini menunjukkan terjadinya mekanisme agregasi dan pertumbuhan sekunder dari partikel silika yang terbentuk melalui nukleasi homogen dalam larutan dan terdeposisi ke permukaan. Morfologi ini memperkuat hipotesis bahwa presipitasi silika dalam sistem geothermal tidak hanya terjadi melalui pertumbuhan lapisan dasar, tetapi juga melibatkan partikel tersuspensi yang membentuk struktur 3D kompleks.



Gambar 3. Perkembangan morfologi dan struktur lapisan presipitasi silika *geothermal* selama waktu paparan yang berbeda (D.B van den Heuvel *et al*, 2018).

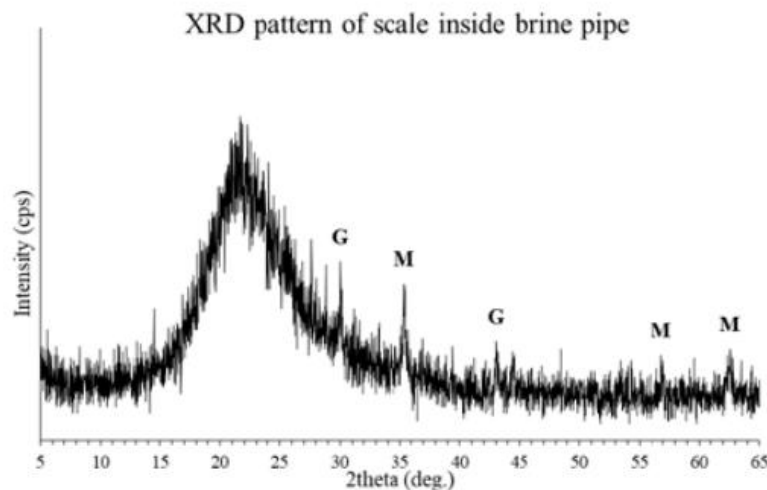
Sementara lanjutan mekanisme deposisi partikel silika dan kontribusinya terhadap pertumbuhan struktur 3D, dapat dijelaskan pada gambar 4. memperlihatkan citra FEG-SEM dari partikel silika yang terdeposisi pada permukaan lapisan silika botrioidal. Tiga mode interaksi antara partikel dan permukaan dapat diidentifikasi berdasarkan perbedaan morfologi dan integrasi antarfasanya. Citra pada panel A menunjukkan akumulasi partikel silika dengan ukuran mikro yang saling melekat satu sama lain membentuk agregat tersimen. Proses ini mengindikasikan adanya flokuasi dan koagulasi partikel silika dalam larutan sebelum mencapai permukaan, kemudian mengendap secara kolektif. Kecenderungan partikel membentuk struktur berlapis ini memperkuat indikasi adanya pertumbuhan sekunder yang dipandu oleh mekanisme nukleasi homogen di dalam fase cair, bukan semata hasil pertumbuhan dari substrat. Panel B menampilkan partikel silika berukuran mikro yang tersimen langsung pada permukaan botrioidal silika. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun nukleasi terjadi di dalam fluida, permukaan silika padat tetap menjadi lokasi deposisi utama. Ikatan antarpartikel dan permukaan menunjukkan keberadaan gaya adhesi dan interaksi kimia antarfasanya, yang kemungkinan diperkuat oleh konsentrasi tinggi silika monomerik dan kation seperti Na^+ atau Ca^{2+} yang memediasi jembatan antar permukaan. Citra panel C memperlihatkan partikel yang jarang sekali terinkorporasi langsung ke dalam struktur lapisan botrioidal. Partikel ini sebagian terbenam, namun tampak sebagai entitas terpisah yang tidak mengalami pelapisan lanjutan. Hal ini mengindikasikan bahwa inkorporasi penuh ke dalam struktur lapisan tidak selalu terjadi, kemungkinan akibat perbedaan ukuran, waktu deposisi, atau dinamika aliran yang membawa partikel menjauh sebelum sempat mengintegrasikan penuh.



Gambar 4. Deposisi partikel silika dan kontribusinya terhadap pertumbuhan struktur (D.B van den Heuvel *et al*, 2018).

Secara keseluruhan, data morfologi dari FESEM ini memperkuat pemahaman bahwa *silica scaling* merupakan fenomena bertahap dengan dinamika spasial dan temporal yang kompleks, dikendalikan oleh keseimbangan antara kinetika presipitasi, arus fluida, dan kondisi permukaan. Pemahaman terhadap struktur mikroskopik ini menjadi krusial dalam pengembangan strategi mitigasi fouling di sistem geothermal, serta menjadi dasar desain antarmuka material yang lebih tahan terhadap presipitasi silika.

Karakteristik amorf dari *silica scaling* dapat diverifikasi melalui *X-Ray Diffraction (XRD)*, yang menunjukkan pola difraksi amorf berupa *broad hump* alih-alih puncak tajam khas kristal, sebagaimana diperlihatkan pada gambar 5, *scaling* yang terbentuk didominasi silika amorf, yang menjelaskan mengapa morfologi *scaling* tidak memperlihatkan struktur kristal yang jelas (seperti bidang faset atau pertumbuhan epitaksial). Keberadaan mineral kristalin minor (gypsum/M) dapat memperkuat atau memecah struktur silika, tergantung distribusinya. Silika amorf berperan sebagai matriks penyemen, sedangkan mineral minor berperan sebagai nukleus atau impuritas yang mempercepat pertumbuhan tidak teratur.



Gambar 5. Hasil analisa XRD *silica scale* (Juhri *et al.*, 2019).

Selain itu, analisis dengan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)* mengungkapkan keberadaan gugus silanol (Si–OH) dan siloksan (Si–O–Si) yang umum terdapat pada silika amorf, serta menandakan reaktivitas permukaan yang tinggi. Hal ini menjadikan *silica scaling* sangat cocok untuk difungsionalisasi secara kimiawi, misalnya untuk dijadikan basis *functional materials* yang sensitif terhadap pH, ion logam berat, atau senyawa organik.

Lebih lanjut, studi *Brunauer–Emmett–Teller (BET)* terhadap silika *scaling* menunjukkan bahwa struktur pori yang dimiliki material ini umumnya berada dalam kategori mesopori (2–50 nm), dengan luas permukaan spesifik yang cukup tinggi. Ciri ini menjadikannya kandidat kuat untuk aplikasi seperti adsorben dalam pengolahan air limbah, atau sebagai media pendukung katalis heterogen. Karakterisasi porositas silika *scaling* yang diambil langsung dari sistem geothermal—menunjukkan perbedaan mencolok antara kondisi unsintered dan sintered. Berdasarkan analisis BET, t-Plot, dan BJH, BL-silica unsintered pada gambar 6, menunjukkan luas permukaan spesifik yang cukup tinggi sebesar 50 m²/g, dengan volume pori mencapai 0.24 cm³/g dan rata-rata diameter pori 23 nm, yang berada dalam rentang mesopori. Sementara itu, setelah proses sintering, terjadi penurunan drastis pada seluruh parameter porositas: luas permukaan turun menjadi 1 m²/g, volume pori hanya 0.001 cm³/g, dan tidak terdeteksi adanya ukuran pori signifikan oleh metode BJH (Svavarsson *et al.*, 2014). Temuan ini menunjukkan bahwa *silica scaling geothermal* pada kondisi aslinya (tanpa sintering)

memiliki struktur yang relatif berpori dan berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai material penyerap atau penopang katalis. Namun, ketika mengalami suhu tinggi atau perlakuan termal lanjutan, pori-pori tersebut mengalami kolaps, menghasilkan struktur padat yang menyerupai morfologi hasil SEM sebelumnya yakni aglomerat botrioidal yang saling tersementasi.

BL-silica	BET spec. surf. area [m ² /g]	Micropore surf. area t-Plot [m ² /g]	Vol. of pores with diameter 1.7 – 300 nm [cm ³ /g]	BJH adsorption av. pore width [nm]
Unsintered	50	6	0.24	23
Sintered	1	0.3	0.001	N/A

Gambar 6. Hasil uji BET silica scaling geothermal (Svavarsson *et al.*, 2014).

Dibandingkan dengan pasir kuarsa yang memiliki struktur kristalin padat dan permukaan relatif inert, silika amorf dari *scaling* lebih unggul dalam hal:

- Reaktivitas permukaan: lebih mudah mengalami modifikasi kimia,
- Kapasitas adsorpsi: karena luas permukaan dan struktur pori yang lebih besar,
- Kesorbagunaan aplikasi: mulai dari bahan bangunan ringan, filler komposit, hingga *high-performance ceramics*.

Namun demikian, keberadaan impuritas seperti Al, Fe, dan Na dalam jumlah tertentu dapat mempengaruhi sifat material, terutama jika ditujukan untuk aplikasi yang memerlukan kemurnian tinggi, seperti elektronik atau biomedical.

KOMPOSISI KIMIA DAN KANDUNGAN IMPURITAS SILICA SCALING

Silica scaling yang terbentuk pada sistem pembangkit listrik geothermal terutama tersusun atas silika (SiO₂), yang merupakan hasil presipitasi dari larutan fluida panas bumi saat terjadi perubahan tekanan dan temperatur dari reservoir ke permukaan. Beberapa studi telah melaporkan konsentrasi SiO₂ yang tinggi dalam endapan scaling, menjadikannya sebagai bahan yang sangat potensial untuk dikembangkan lebih lanjut. Sebagai contoh, Silviana *et al.* (2017) mencatat bahwa kandungan silika dalam endapan scaling mencapai 88,45%, sementara Adiatama *et al.* (2022) melaporkan kemurnian yang lebih tinggi, yaitu 96,79%. Perbedaan ini mencerminkan variasi geokimia antar reservoir geothermal di Indonesia, yang dipengaruhi oleh mineralogi batuan induk dan karakteristik fluida reservoir. Selain silika sebagai komponen utama, scaling ini juga mengandung unsur minor dan trace elements seperti Fe₂O₃, Al₂O₃, CaO, dan Na₂O dalam konsentrasi yang relatif kecil. Kehadiran oksida logam ini dapat memengaruhi kemurnian silika dan berimplikasi terhadap potensi aplikasi downstream-nya. Kehadiran unsur-unsur pengotor dalam silika scaling geothermal seperti Fe, Al, Ca, Na, dan Mg sering kali dianggap sebagai hambatan bagi proses pemurnian. Namun, pandangan ini dapat bergeser jika kita mempertimbangkan konsep *value-added impurities*, yaitu impuritas yang justru membuka jalur aplikasi baru melalui fungsi kimianya.

1. Besi (Fe_2O_3): Potensi untuk Aplikasi Katalitik dan Magnetik

Besi merupakan impuritas dominan kedua dalam banyak endapan scaling geothermal, dengan konsentrasi berkisar 0,5–5% tergantung lokasi. Dalam dunia material maju, silika yang terdoping Fe telah terbukti meningkatkan aktivitas fotokatalitik, terutama untuk degradasi senyawa organik dan pemurnian air. Fe juga berperan sebagai situs aktif dalam reaksi redoks pada aplikasi elektroda atau katalis Fenton. Oleh karena itu, silika dengan doping Fe alami berpotensi langsung digunakan tanpa modifikasi lanjutan, sehingga memangkas biaya sintesis material fungsional.

2. Aluminium (Al_2O_3): Stabilitas Termal dan Aplikasi Geopolimer

Aluminium dalam silika scaling, walaupun biasanya hanya 1–2%, berperan penting dalam membentuk struktur aluminosilikat yang stabil pada suhu tinggi. Silika dengan kandungan Al cocok digunakan sebagai precursor geopolimer—bahan alternatif ramah lingkungan pengganti semen portland. Selain itu, Al dalam matriks silika juga meningkatkan kemampuan adsorpsi terhadap ion logam berat karena modifikasi permukaan (Lewis acid site) yang lebih aktif.

3. Kalsium (CaO): Pengaruh terhadap Kristalisasi dan Sifat Mekanik

CaO bisa berperan ganda. Di satu sisi, keberadaannya bisa mengganggu struktur amorf silika dan mendorong kristalisasi menjadi wollastonite (CaSiO_3), yang berdampak pada menurunnya luas permukaan spesifik. Namun, di sisi lain, kalsium juga berguna untuk memperkuat struktur material pada aplikasi konstruksi, terutama sebagai filler dalam mortar, keramik ringan, atau material bangunan isolatif berbasis silika-Ca.

4. Natrium dan Magnesium: Faktor Kelarutan dan Sifat Ionik

Na dan Mg meskipun hanya dalam jumlah kecil (trace level), dapat memengaruhi kelarutan silika dan karakteristik permukaan partikel. Natrium misalnya mempercepat reaktivitas dalam proses sol-gel karena efek ioniknya terhadap jaringan siloksan. Magnesium bisa memperkuat interaksi antarmolekul dalam film tipis berbasis silika atau meningkatkan daya ikat pada komposit polimer.

METODE EKSTRAKSI DAN TRANSFORMASI SILICA SCALING

Transformasi *silica scaling* menjadi material silika bernilai tambah memerlukan pendekatan yang tidak hanya mempertimbangkan aspek efisiensi teknis, tetapi juga keterjangkauan biaya dan keberlanjutan proses. Berdasarkan karakterisasi awal yang menunjukkan bahwa komponen utama dari *silica scaling* di berbagai wilayah panas bumi di Indonesia adalah SiO_2 dalam bentuk amorf atau semi-kristalin, dengan keberadaan sejumlah pengotor seperti Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , dan logam berat, maka diperlukan strategi ekstraksi dan purifikasi yang tepat guna menghasilkan silika dengan kemurnian dan morfologi yang sesuai untuk aplikasi lebih lanjut. Tahapan-tahapan tersebut dapat dijelaskan pada gambar 7.

1. Pra-persiapan Material

Langkah awal yang umum dilakukan mencakup pengeringan *silica scaling* pada suhu 105–110 °C untuk menghilangkan kadar air bebas, diikuti oleh proses penghancuran mekanis menggunakan ball mill agar diperoleh partikel dengan ukuran yang seragam dan luas permukaan spesifik yang lebih tinggi. Sampel kemudian disaring (mesh 100–200) dan dianalisis menggunakan XRF untuk mengetahui komposisi kimia, XRD untuk identifikasi fasa, serta SEM-EDS untuk morfologi dan distribusi unsur.

2. Ekstraksi Silika Menggunakan Metode Alkali

Metode paling banyak digunakan dalam literatur untuk mengekstraksi silika dari biomassa dan scaling adalah dengan konversi SiO_2 menjadi natrium silikat larut air melalui perlakuan alkali. *Silica scaling* direaksikan dengan larutan NaOH (1–2 M) pada suhu 80–100 °C selama 1–3 jam di bawah pengadukan konstan. Reaksi ini memungkinkan pembentukan natrium silikat (Na_2SiO_3), yang kemudian dipisahkan dari sisa padatan melalui filtrasi. Tahap ini efektif melarutkan sebagian besar fraksi silika amorf, meskipun efektivitasnya dapat menurun jika terdapat fasa kuarsa atau silikat kompleks lainnya.

3. Presipitasi Silika Amorf

Larutan natrium silikat hasil ekstraksi alkali selanjutnya dititrasi secara perlahan dengan asam kuat (umumnya HCl atau H_2SO_4) untuk mengendapkan kembali silika dalam bentuk gel amorf. Proses ini dilakukan dengan mengatur pH larutan pada kisaran 7–9, di mana terbentuk larutan silikat terpolimerisasi (H_2SiO_3) yang mengalami kondensasi membentuk $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Endapan dicuci berkali-kali untuk menghilangkan sisa ion Na^+ dan Cl^- , kemudian dikeringkan pada suhu rendah (60–80 °C) untuk memperoleh silika kering. Proses ini dapat dimodifikasi untuk menghasilkan silika nano atau silika mesopori tergantung pada kondisi presipitasi dan aging.

4. Pemurnian Tambahan

Silika hasil presipitasi umumnya masih mengandung kontaminan logam seperti Fe, Al, dan Ca. Oleh karena itu, dilakukan pemurnian tambahan menggunakan leaching asam (misalnya HCl 0,5–2 M) selama 1–2 jam pada suhu 60–80 °C. Leaching ini mampu menurunkan kadar pengotor hingga di bawah 1%, menjadikannya layak untuk aplikasi sensitif seperti bahan katalis, membran, atau pengisi polimer. Alternatif lain termasuk penggunaan EDTA atau proses pemurnian ion-exchange untuk meningkatkan selektivitas terhadap ion logam tertentu.

5. Transformasi Menjadi Produk Fungsional

Silika hasil pemurnian dapat ditransformasikan lebih lanjut tergantung pada aplikasi akhir yang diinginkan:

- Silika Gel / Sol-Gel

Dengan metode sol-gel, larutan silikat diasamkan dan dibiarkan mengalami aging untuk membentuk gel yang kemudian dikeringkan menjadi xerogel, aerogel, atau cryogel. Produk ini berguna sebagai adsorben, isolator termal, dan media katalitik karena luas permukaan spesifiknya yang tinggi (Singh *et al.*, 2014).

- Silika Mesopori / Nano-silika

Untuk aplikasi sebagai filler atau adsorben, digunakan pendekatan templating (menggunakan surfaktan seperti CTAB) selama presipitasi, diikuti kalsinasi untuk menghasilkan struktur pori-pori yang seragam. Dengan proses templating (menggunakan surfaktan seperti CTAB), silika scaling dapat dimodifikasi menjadi mesoporous silica (ukuran pori 2–50nm, sering digunakan SBA-15, MCM-41) melalui presipitasi dan kalsinasi, menghasilkan struktur yang teratur dan seragam (Han *et al.*, 2024; Fatimah *et al.*, 2025). Nano-silika berperan sebagai filler komposit polimer, adsorben, material katalitik, bahkan dalam *delivery* untuk obat-obatan dan kosmetik. Produk nanopartikel silika banyak dimanfaatkan di industri biomedis dan adsorben karena kestabilan dan areanya yang luas (Fatimah *et al.*, 2025; Farjadian *et al.*, 2019).

- Komposit dan Geopolimer

Silika dari *scaling* juga dapat digunakan sebagai fraksi aktif dalam campuran geopolimer bersama *fly ash* atau slag, dengan aktivator alkali. Produk ini cocok untuk aplikasi struktural, penahan api, atau penyerap logam berat, studi-studi menunjukkan bahwa tambahan silika amorf meningkatkan kekuatan tekan dan ketahanan kimia geopolimer, dengan kandungan Si/Al yang optimal menghasilkan geopolimer berpori dengan specific surface area tinggi (Xu *et al.*, 2025; Guo *et al.*, 2024).

Dengan pendekatan ini, *silica scaling* yang semula merupakan limbah yang mengganggu operasi sistem panas bumi berpotensi menjadi sumber daya lokal untuk produksi material silika bernilai tambah.



Gambar 7. Siklus konversi *silica scaling* menjadi produk bernilai tambah.

PEMETAAN POTENSI APLIKATIF BERDASARKAN SIFAT MATERIAL

Silica scaling yang dihasilkan dari fluida panas bumi menunjukkan karakteristik kimia dan fisika yang cukup unik dibandingkan dengan sumber silika alami seperti pasir kuarsa atau batu silika. Berdasarkan hasil karakterisasi yang telah dilakukan di berbagai lokasi di Indonesia, *silica scaling* umumnya memiliki kandungan utama berupa SiO_2 berkisar antara 88–97%, disertai dengan berbagai impuritas seperti Fe, Ca, Al, Mg, Na, K, dan terkadang unsur jejak seperti Li, B, dan As. Variasi komposisi ini sangat dipengaruhi oleh kondisi geokimia reservoir dan proses presipitasi yang terjadi selama transportasi fluida panas bumi ke permukaan.

Dari perspektif aplikatif, kemurnian dan bentuk morfologi silika merupakan faktor utama yang menentukan potensi penggunaannya. Beberapa sifat unggulan dari *silica scaling*—seperti ukuran partikel yang relatif halus, luas permukaan spesifik tinggi, serta kandungan amorf silika yang cukup tinggi—membuka peluang besar untuk diarahkan pada berbagai aplikasi fungsional. Secara umum, potensi aplikatif *silica scaling* dapat dipetakan pada gambar 8 sebagai berikut:

Sifat Material dan Aplikasi

Sifat	Aplikasi	Catatan
 Kandungan SiO_2 Tinggi ($\geq 90\%$)	Bahan baku silika presipitasi/silika gel	Diperlukan purifikasi minimal dan proses modifikasi permukaan
 Silika Amorf	Adsorben, katalis pendukung	Cocok untuk aplikasi di bidang lingkungan dan kimia
 Luas Permukaan Tinggi	Material elektroda, sensor	Distribusi ukuran pori harus dikontrol
 Kehadiran Fe dan Al	Pigmen keramik, adsorben logam berat	Impuritas dapat menambah nilai dalam aplikasi tertentu
 Kandungan Na dan K Tinggi	Potensi sebagai bahan baku geopolimer	Pengontrolan rasio aktivator diperlukan
 Unsur Toksik (mis. As, B)	Harus dihindari untuk aplikasi pangan/kosmetik	Dekontaminasi diperlukan atau hanya digunakan untuk aplikasi industri non-kritis

Gambar 8. Potensi aplikatif *silica scaling geothermal*.

Dengan karakter tersebut, arah pemanfaatan *silica scaling* dapat dibagi ke dalam dua pendekatan:

1. Pendekatan substitusi parsial yaitu menggunakan *silica scaling* sebagai substituen parsial untuk bahan baku silika komersial pada industri semen, beton, keramik, atau batu bata ringan. Dalam konteks ini, impuritas seperti Fe dan Al tidak menjadi hambatan, bahkan dapat berkontribusi pada sifat mekanik atau termal produk akhir.

2. Pendekatan rekayasa material fungsional, seperti untuk produksi silika gel, katalis pendukung, atau adsorben dalam pengolahan limbah cair/gas. Aplikasi ini membutuhkan silika dengan tingkat kemurnian lebih tinggi dan kontrol morfologi yang ketat, sehingga diperlukan proses purifikasi dan pemrosesan lanjutan seperti pengendapan kimia, pemanasan, atau aktivasi permukaan.

KESIMPULAN

Silica scaling geothermal Indonesia merupakan sumber daya bernilai tinggi, bukan sekadar limbah operasional. Struktur amorfnya dan kandungan 88–97% SiO₂, mesoporositas (2–50 nm), dan morfologi yang dapat disesuaikan—dari lapisan botrioidal hingga agregat nano—memungkinkan konversi menjadi material industri melalui ekstraksi alkali dan presipitasi asam. Secara kritis, pengotor (Fe, Al) meningkatkan fungsionalitas: silika terdoping Fe menjadi katalis berbiaya rendah, sedangkan matriks aluminosilikat meningkatkan stabilitas geopolimer. Data lapangan mengkonfirmasi akumulasi scaling yang cepat (>1 g/m²/hari), menyediakan pasokan bahan baku berkelanjutan. Aplikasi mencakup adsorben kemurnian tinggi (BET: 50 m²/g), filler komposit, dan keramik termstruktur nano, selaras dengan prinsip ekonomi sirkular melalui pengurangan biaya pembuangan limbah dan penciptaan pasar baru. Untuk mewujudkan potensi ini, Indonesia harus membakukan karakterisasi untuk variasi *silica scaling* lokal, mengoptimalkan ekstraksi dengan menyeimbangkan kemurnian (>95% SiO₂) dan efisiensi biaya, dan memperkuat kemitraan industri untuk mengintegrasikan *silica scaling* ke rantai pasok material. Transformasi ini mengubah tantangan operasional *geothermal* menjadi peluang ekonomi, mendukung target *net-zero emission* Indonesia sekaligus memajukan industri berkelanjutan.

REFERENSI

- 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>.
- Ciptadi, S., Patangke, S. 2001. Evaluasi Potensi Silica Scaling Pada Pipa Produksi Lapangan Panas Bumi Lahedong-Sulawesi Utara. In: PROCEEDING OF THE 5 th INAGA ANNUAL SCIENTIFIC CONFERENCE & EXHIBITIONS. Yogyakarta.
- Daniela B. van den Heuvel, Gunnlaugsson, E., Gunnarsson, I., Stawski, M, T., Peacock, L.C., Liane G. Benning. 2018. Understanding amorphous silica scaling under well-constrained conditions inside geothermal pipelines, *Geothermics*, Volume 76. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.07.006>.
- Farjadian, F., Roointan, A., Soliman Mohammadi-Samani, Majid Hosseini. 2019. Mesoporous silica nanoparticles: Synthesis, pharmaceutical applications, biodistribution, and biosafety assessment, *Chemical Engineering Journal*, Volume 359, , Pages 684-705, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.156>.
- Fatima R, Katiyar P and Kushwaha K. 2025. Recent advances in mesoporous silica nanoparticle: synthesis, drug loading, release mechanisms, and diverse applications. *Front. Nanotechnol.* 7:1564188. doi: 10.3389/fnano.2025.1564188.
- Guo, H., Huang, Z., Pantongsuk, T., Yu, T., Zhang, B., Luo, J., & Yuan, P. 2024. Utilisation of Biosilica as Active Silica Source for Metakaolin-Based Geopolymers. *Minerals*, 14(8), 816. <https://doi.org/10.3390/min14080816>.

- Han, Yandong, Lin Zhang, and Wensheng Yang. 2024. "Synthesis of Mesoporous Silica Using the Sol–Gel Approach: Adjusting Architecture and Composition for Novel Applications" *Nanomaterials* 14, no. 11: 903. <https://doi.org/10.3390/nano14110903>.
- Herianto., M.Th, Kristiati, E.A., Bambang Bintarto., Dewi Asmorowati,. 2020. Pengaruh Terbentuknya Sedimen Silika Pada Penurunan Laju Produksi Sumur Panas Bumi. LPPM UPN "Veteran" Yogyakarta Press.
<https://ebtke.esdm.go.id/lintas/id/investasi-ebtke/sector-panas-bumi/potensi> di akses pada 23 Juli 2025.
<https://geoportal.esdm.go.id/ebtke/> di akses pada 25 Juli 2025.
- Juhri, S., Yonezu, K., Yokoyama, T., M Istiawan Nurpratama., Harijoko, A. 2019. FORMATION MECHANISM OF SILICA SCALE IN DIENG GEOTHERMAL POWER PLANT, INDONESIA, In: Proceedings 41st New Zealand Geothermal Workshop Auckland, New Zealand.
- Kashpura V.N., and Potapov V.V. 2000. Study of The Amorphous Silica Scales Formation at The Mutnovskoe Hydrothermal Field (Russia), In: PROCEEDINGS, Twenty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California.
- Mai Al Saadi, Naser Al Haddabi. The Root of Silica Scale Formation and Its Remedy *Glob J Eng Sci.* 3(3): 2019. GJES.MS.ID.000565. DOI: 10.33552/GJES.2019.03.000565.
- Pardelli, P.T., Claretta Tempesti. C., Mannelli. A., Kravos. A., Sabard.A., Francesco Fanicchia, Shiladitya Paul, Raziye Şengun, Hakan Alp Sahiller, Ural Halaçoğlu, Ismail Pekdüz, Stefansson. A., Iwona M.Galeczka. 2021. Design of a Scaling Reduction System for Geothermal Applications. In: E3S Web of Conferences 238. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123801014>.
- Permana, M. A. I., Nandaliarsyad, N., Haq, A. Q. A., Nawansari, M. dan Mulyana, C. 2017. Kajian Potensi Silica Scaling pada Pipa Produksi Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (Geothermal). *Material dan Energi Indonesia* 07(01): 38–42.
- Silviana, Hasbi, R., Sagita, C., Nurhayati, O., Fauzan, A., Suhartana and Hatmoko, J. 2017. Silika Alam dari Limbah Padatan Pengeboran Geotermal di Dieng Sebagai Silika Gel Melalui Proses Ramah Lingkungan. In: Seminar Nasional Teknologi Industri Hijau 2. Universitas Diponegoro. pp.341–346.
- Singh, P.L., Bhattacharyya, K.S., Kumar, R., Mishra, G., Sharma, U., Singh, G., Saurabh Ahalawat. 2014, Sol-Gel processing of silica nanoparticles and their applications, *Advances in Colloid and Interface Science*, Volume 214, Pages 17-37, <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.10.007>.
- Syam, A.N., Hartini Husain, H., Pasaribu, M. 2021. Pengaruh Temperatur Terhadap Pembentukan Silika (SiO₂) Scaling Pada Jalur Pipa Brine Separator Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi. In: e-Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri VIII 2021. ISBN : 978-602-60451-8-8.
- Svavarssona, G.H., Einarssona, S., Asa Brynjolfsdottir, A. 2014. Adsorption applications of unmodified geothermal silica. *Geothermics*, Vol.50, pp30-34. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.08.001>.
- Wahyudityo, R., Andang Widi Harto, W.A., Suryoprato, K. 2013. Analisis Scaling Silika pada Pipa Injeksi Brine di Lapangan Panas Bumi Dieng dengan Studi Kasus di PT. Geo Dipa Energi. *TEKNOFISIKA*, Vol.2 No.1.
- Xu, Y., Wang, X., Yang, L., Liu, Y., Gao, T., Li, H., Wang, Y., Xie, N., Meng, J., Ou, J., & Wang, W. 2025. Geopolymer Modified with Insoluble Calcite and Various Silica Fumes Originated from Different Manufacturing Processes. *Materials (Basel, Switzerland)*, 18(12), 2795. <https://doi.org/10.3390/ma18122795>.