

# **ANALISIS PENGARUH JENIS *CHEMICAL* TERHADAP POTENSI *SILICA* ( $\text{SiO}_2$ ) SCALING PADA JALUR PIPA *BRINE* PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI MENGGUNAKAN *SILICA SATURATION INDEX***

Farhan Bagus Pamungkas<sup>1</sup>, Luchis Rubianto<sup>1</sup>, Maulana Erryan Yavianda<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

<sup>2</sup>PT Geo Dipa Energi Unit Dieng, Dieng, Karangtengah, Kec. Batur, Kab. Banjarnegara, Indonesia

farhanbagus74@gmail.com ; [luchis.rubianto@polinema.ac.id]

## **ABSTRAK**

Panas bumi merupakan sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar di Indonesia, terutama dalam pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP). Namun, tingginya kandungan *silica* dalam *brine* dapat menyebabkan masalah pengendapan *silica* (*silica scaling*) yang berdampak pada biaya perawatan. Penelitian ini menganalisis pengaruh jenis *chemical*, yaitu asam  $\text{H}_2\text{SO}_4$  dan *inhibitor antiscalant* berbasis polimer, terhadap nilai *Silica Saturation Index* (SSI) untuk mencegah pengendapan. Metode penelitian deskriptif kuantitatif digunakan dengan pengambilan data melalui observasi dan analisis laboratorium. Hasil menunjukkan bahwa injeksi asam  $\text{H}_2\text{SO}_4$  lebih efektif dalam menjaga pH dan menurunkan nilai SSI dibandingkan dengan *inhibitor antiscalant*. Nilai SSI terendah yang diperoleh adalah 0,733 untuk  $\text{H}_2\text{SO}_4$  dan 1,043 untuk *inhibitor antiscalant*. Faktor-faktor seperti pH, suhu, dan salinitas mempengaruhi pengendapan *silica*, sehingga pemilihan jenis inhibitor harus mempertimbangkan kondisi sumur dan biaya. Saran untuk industri mencakup pengujian konsentrasi optimal inhibitor dan penggunaan flokulasi koagulan untuk meningkatkan efektivitas pencegahan pengendapan.

**Kata kunci:** *inhibitor, panas bumi, silica scaling, silica saturation index*

## **ABSTRACT**

*Geothermal energy is a renewable energy source with great potential in Indonesia, especially in geothermal power plants (PLTP). However, the high silica content in brine can cause silica scaling issues, which impact maintenance costs. This study analyzes the effect of chemical types, namely  $\text{H}_2\text{SO}_4$  acid and polymer-based antiscalant inhibitors, on the Silica Saturation Index (SSI) value to prevent precipitation. The descriptive quantitative research method was used with data collection through observation and laboratory analysis. The results show that the injection of  $\text{H}_2\text{SO}_4$  acid is more effective in maintaining pH and reducing SSI values compared to the antiscalant inhibitor. The lowest SSI value obtained was 0.733 for  $\text{H}_2\text{SO}_4$  and 1.043 for the antiscalant inhibitor. Factors such as pH, temperature, and salinity affect silica precipitation, so the selection of the type of inhibitor must consider well conditions and costs. Recommendations for the industry include testing the optimal concentration of inhibitors and using coagulant flocculants to enhance the effectiveness of deposition prevention.*

**Keywords:** *inhibitor, geothermal, silica scaling, silica saturation index*

## **1. PENDAHULUAN**

Panas bumi, atau geothermal, adalah salah satu sumber energi terbarukan yang berasal dari dalam kerak bumi [1]. Di Indonesia, potensi sumber energi geothermal cukup



besar. Jenis geothermal yang ada di Indonesia termasuk dalam kategori entalpi menengah hingga entalpi tinggi. Oleh karena itu, geothermal dapat menjadi alternatif pembangkit listrik yang mendukung peningkatan rasio elektrifikasi di Indonesia [2]. *Geothermal brine* adalah hasil pemisahan dalam separator yang biasanya diinjeksi ulang ke reservoir untuk manajemen [3]. *Brine* memiliki potensi termal untuk penggunaan langsung (*direct use*) seperti pemanasan atau pembangkitan listrik menggunakan fluida kerja. Kandungan kimia seperti  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NaCl}$ , dan logam berat membuatnya berpotensi merusak lingkungan bila tidak ditangani dengan tepat [4].

Pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP), kondisi sumur umumnya menunjukkan bahwa kandungan air (*brine*) lebih banyak dibandingkan dengan uap, dengan perbandingan sekitar 70% berbanding 30%. *Brine* ini mengandung *silica* dalam jumlah tinggi, yang sering menyebabkan masalah pada jalur pipa produksi, yaitu terjadinya *silica scaling* [5]. *Silica scaling* ini dapat mengakibatkan biaya perawatan yang tinggi. Di area PLTP, terdapat beberapa sumur dengan kondisi yang bervariasi. Perbedaan kondisi sumur ini mempengaruhi metode dan bahan yang digunakan dalam pengendalian *silica scaling* [6]. *Scaling* merupakan pembentukan endapan mineral pada permukaan kontak, terutama disebabkan kandungan *silica* dalam uap. Faktor yang mempengaruhi kelarutan *silica* meliputi temperatur, salinitas, dan pH. Perubahan kondisi sistem menyebabkan ion melebihi kelarutan dan membentuk endapan [7]. *Scaling* umum terjadi di pipa *wellhead-separator*, *flasher*, jalur cairan, dan sumur reinjeksi, mengganggu operasi *geothermal* dengan menyumbat aliran dan mengurangi efisiensi. Pencegahan dilakukan menggunakan inhibitor kimia seperti  $\text{HCl}$  atau  $\text{H}_2\text{SO}_4$  yang menjaga partikel tetap terlarut dengan mencegah polimerisasi *silica*, terutama pada kondisi asam dimana laju polimerisasi minimum [8].

Salah satu langkah untuk mencegah terjadinya *silica scaling* pada jalur pipa produksi adalah dengan melakukan injeksi bahan kimia pada separator *downstream* pipa *brine*. Di wilayah kerja panas bumi PAD A, injeksi dilakukan menggunakan asam  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Sementara itu, di wilayah kerja panas bumi lainnya, yaitu PAD B, digunakan *Scale Inhibitor* berbasis polimer sebagai bahan injeksi untuk mengurangi kemungkinan terjadinya *silica scaling*. Penggunaan bahan kimia *Scale Inhibitor* ini masih tergolong baru, sehingga perlu dievaluasi efisiensinya dalam mengurangi *silica scaling*. Parameter yang digunakan untuk menilai potensi terjadinya *silica scaling* dikenal sebagai *Silica Saturation Index* [9].

*Scale Inhibitor* adalah senyawa kimia yang dapat menghambat atau memblokir pembentukan endapan mineral ketika diaplikasikan dalam konsentrasi rendah pada larutan air [10]. Penggunaan zat ini sangat efisien karena dosis minimal dapat memberikan perlindungan jangka panjang terhadap pembentukan kerak. Cara kerja dari *scale inhibitor* terdiri dari dua mekanisme utama yaitu, inhibitor melekat pada bagian luar kristal kerak saat fase awal pembentukan [11,12]. Molekul inhibitor yang berukuran besar akan melapisi kristal kecil dan menghentikan perkembangan lebih lanjut. Kemudian pada berbagai kondisi, senyawa kimia ini efektif mencegah adhesi partikel-partikel terhadap permukaan material padat [13].

Upaya untuk mencegah *silica scaling* juga dapat dilakukan menggunakan *chemical* lain berupa asam yaitu Asam Fluorida (HF). Asam fluorida memiliki efisiensi dalam melarutkan kerak *silica* sebesar 21% dengan konsentrasi 15% [14]. Konsentrasi tersebut merupakan konsentrasi yang optimal sehingga tidak menimbulkan korosi karena sifat dari asam fluorida

yang korosif [15]. Dengan adanya perbedaan jenis chemical yang digunakan untuk mencegah *silica scaling* pada jalur pipa *brine*, maka diperlukan penelitian untuk mengetahui pengaruh jenis *chemical* tersebut terhadap nilai *Silica Saturation Index*.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu neraca analitik *mettler toledo*, gelas ukur *pyrex* 100 mL, Spektrofotometer HACH DR6000 UV Vis.

Metode penelitian yang diterapkan adalah penelitian deskriptif kuantitatif, di mana data dikumpulkan melalui observasi langsung di lapangan dan di laboratorium. Pengambilan data di laboratorium mencakup analisis kadar *silica* pada jalur *brine*, serta pengukuran suhu *inlet* dan *outlet* pada jalur tersebut. Selanjutnya, dilakukan evaluasi terhadap sistem kerja pada jalur *brine* untuk memahami proses pembentukan *silica scaling*. *Silica Saturation Index* (SSI) menjadi parameter utama dalam penelitian ini, karena digunakan untuk menentukan apakah *silica scaling* dapat terjadi. Nilai SSI diperoleh dengan membandingkan konsentrasi *silica* dari analisis dengan konsentrasi *silica* yang dihitung berdasarkan nilai temperatur *brine*.

### 2.1. Preparasi Sampel

Menyiapkan larutan FAD (HCl 0,1 N) terlebih dahulu. Timbang botol sampel 100 mL dalam keadaan kosong dan catat hasilnya sebagai  $W_0$ . Selanjutnya, masukkan 90 mL larutan FAD ke dalam botol sampel dan catat hasilnya sebagai  $W_1$ . Ambil sampel *brine* dari *downstream separator* dengan membuka *valve* dan tunggu hingga suhu turun. Setelah itu, filtrasi sampel *downstream* menggunakan filter 0,45 mikrometer, lalu masukkan larutan hasil filtrasi ke dalam botol sampel yang sudah berisi 10 mL larutan FAD. Ulangi langkah ini untuk mengambil sampel dari *Outlet Atmospheric Flash Tank* dan *Inlet Pond*. Terakhir, timbang kembali botol sampel yang kini berisi 90 mL larutan FAD dan 10 mL hasil sampling, catat hasilnya sebagai  $W_2$ , dan hitung nilai faktor X (pengenceran) dengan rumus

$$\text{Faktor X} = \frac{(W_2 - W_0)}{(W_2 - W_1)} \quad (1)$$

### 2.2. Analisis pH

Menyiapkan alat pH meter yang telah dikalibrasi, kemudian membuka *valve downstream separator* dan ditunggu hingga suhu hangat/dingin. Meletakkan sampel *brine* yang sudah dingin ke dalam gelas kecil. Setelah itu, melakukan pengecekan pH pada sampel dan dicatat hasilnya.

### 2.3. Analisis Kelarutan $\text{SiO}_2$ Aktual

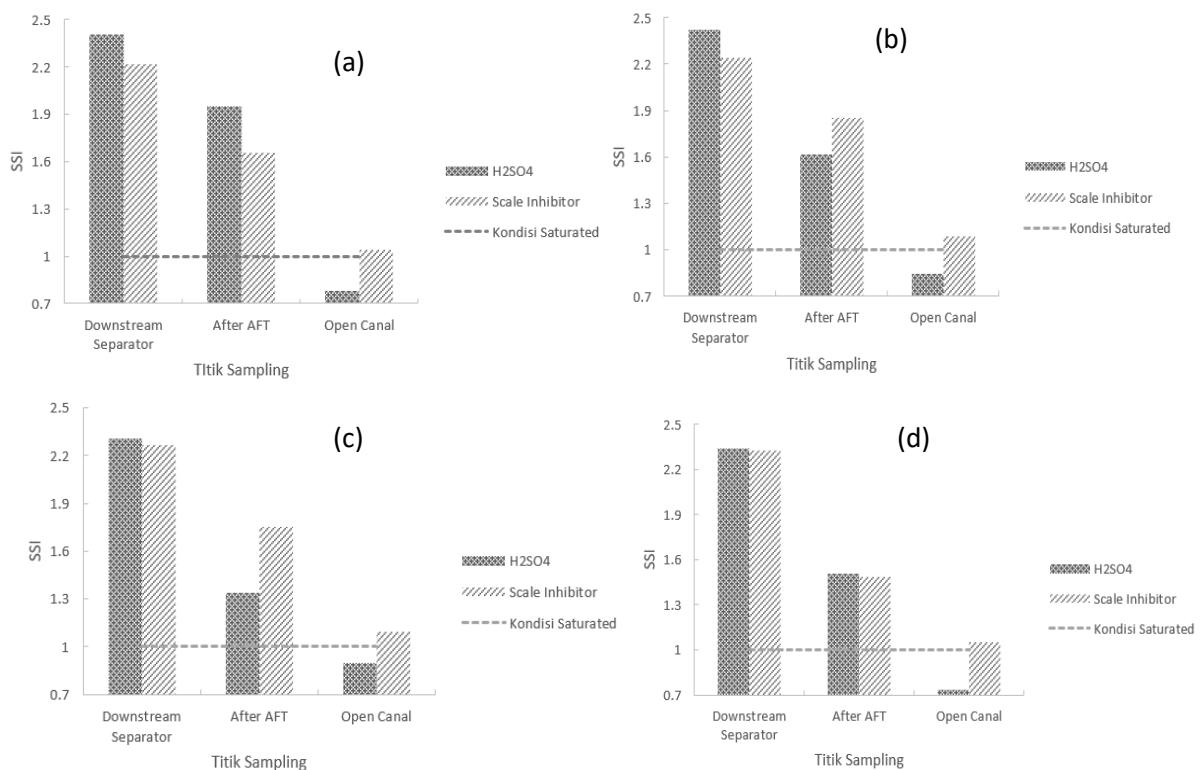
Menyiapkan tiga reagen yang akan digunakan yaitu reagen *molybdate*, reagen asam, dan asam sitrat. Kemudian 10 mL sampel dimasukkan ke dalam kuvet dan ditambahkan reagen *molybdate* serta reagen asam pada setiap sampel. Setelah itu, ditunggu selama 10 menit untuk bereaksi. Kemudian asam sitrat ditambahkan ke dalam sampel dan ditunggu selama 2 menit. Setelah selesai, spektrofotometer dikalibrasi dengan menggunakan larutan tanpa sampel (blanko). Kemudian kuvet berisi sampel yang telah ditambahkan reagen, dimasukkan ke dalam kolom spektrofotometer, lalu tekan "Read" untuk memulai pengukuran sampel. Setelah selesai, dicatat perolehan data konsentrasi pada setiap sampel.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian yang telah dilakukan bertujuan untuk menganalisis pengaruh jenis inhibitor terhadap nilai *Silica Saturation Index* yang ditinjau dari pembentukan *silica scaling* pada *downstream separator*.

#### 3.1. Pengaruh Jenis Inhibitor Terhadap *Silica Saturation Index*

*Silica Saturation Index* merupakan parameter yang krusial untuk menentukan kemungkinan terjadinya pembentukan *silica scaling* pada *geothermal industry* [16]. *Silica Saturation Index* didapatkan dari hasil perbandingan konsentrasi *silica* terlarut dengan konsentrasi *silica* amorf dengan melakukan sampling pada *brine* untuk mengetahui kandungan *silica* serta mengetahui suhu *brine* [17].



**Gambar 1.** Grafik perbandingan nilai *silica saturation index* (a) hari kedua (b) hari ketiga (c) hari keempat (d) hari keenam

Berdasarkan pengamatan yang dilakukan, terlihat bahwa nilai SSI yang diperoleh dari *brine* yang diinjeksi dengan asam ( $H_2SO_4$ ) secara rata-rata menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan *brine* yang diinjeksi menggunakan *inhibitor antiscalant* berbasis polimer. Nilai SSI yang ideal dan menunjukkan kemungkinan kecil terjadinya *silica scaling* adalah di bawah 1. Hasil pengamatan selama enam hari secara konsisten menunjukkan bahwa perlakuan dengan  $H_2SO_4$  mampu mempertahankan nilai SSI di bawah ambang batas ini, menandakan pencegahan *scaling* yang lebih efektif.

Grafik perbandingan nilai SSI selama observasi enam hari secara jelas memperlihatkan perbedaan efektivitas antara  $H_2SO_4$  dan *inhibitor antiscalant*. Pada hari 4 dan hari 6, lokasi pengambilan sampel seperti *Downstream Separator* dan *After AFT Open Canal* menunjukkan bahwa aplikasi  $H_2SO_4$  secara konsisten menghasilkan angka SSI yang lebih kecil, mencapai atau di bawah angka 1 (keadaan *saturated* atau *undersaturated*).

Sebaliknya, penggunaan *inhibitor antiscalant* cenderung memunculkan nilai SSI yang lebih besar, mengindikasikan potensi *scalling* yang lebih tinggi.

Secara matematis, *Silica Saturation Index (SSI)* ditentukan dengan membandingkan konsentrasi *silica* yang sebenarnya terlarut dalam cairan geothermal (*brine*) dengan konsentrasi *silica* jenuh pada kondisi suhu dan tekanan spesifik. Ketika nilai SSI mendekati atau melampaui angka 1, ini menandakan bahwa *brine* telah mencapai atau bahkan melewati titik jenuhnya terhadap *silica*. Situasi ini menunjukkan adanya risiko tinggi terbentuknya endapan *silica* karena *brine* tidak lagi mampu menahan *silica* terlarut. Sebaliknya, jika nilai SSI berada di bawah 1, hal ini mengindikasikan bahwa *brine* masih memiliki kemampuan untuk melarutkan *silica* lebih lanjut, sehingga kemungkinan terjadinya presipitasi *silica* sangat rendah.

Penelitian terbaru yang dilakukan oleh Longval, dkk. (2024) menjelaskan bahwa “*By decreasing the pH to below 5 through dosing with acid, the supersaturated solution can be reinjected without causing significant scaling issues*”. Penelitian tersebut mendukung hasil pengamatan bahwa melalui injeksi asam  $H_2SO_4$  efektif dalam mengendalikan *silica scaling* [18].

### 3.2. Faktor-faktor yang Mempengaruhi *Silica Scalling*

Terbentuknya *silica scaling* dipengaruhi secara signifikan oleh sejumlah parameter penting, meliputi tingkat keasaman (pH), temperatur, dan kandungan garam dalam *brine*. Pemahaman mengenai keterkaitan antar parameter tersebut menjadi kunci dalam pencegahan yang optimal.

Pembentukan *silica scaling* dipengaruhi oleh beberapa variabel utama, termasuk pH, suhu, dan salinitas cairan. Dari ketiga faktor tersebut, pH memainkan peran paling krusial dalam mengatur kelarutan *silica*. Asam sulfat ( $H_2SO_4$ ), sebagai asam yang kuat, sangat efektif dalam mencegah *silica scaling* dengan cara menurunkan dan mengendalikan tingkat pH cairan [19]. Mekanisme kerja asam sulfat ( $H_2SO_4$ ) dalam menghambat *silica scaling* sangat erat kaitannya dengan kemampuannya menurunkan pH *brine* secara signifikan. Injeksi  $H_2SO_4$  dapat dengan efektif menurunkan tingkat keasaman *brine* sehingga dapat menghambat proses polimerisasi *silica*. Perlu diingat bahwa polimerisasi *silica* ini sangat bergantung pada tingkat pH. Pada pH rendah (kondisi asam), *silica* cenderung tetap terlarut sebagai bentuk monomerik (seperti asam silikat,  $H_4SiO_4$ ). Sebaliknya, pada pH yang lebih tinggi, *silica* lebih mudah mengalami polimerisasi dan kondensasi, yang akhirnya memicu pembentukan endapan atau *scalling* [20].

Dalam upaya mengendalikan pengendapan *silica* melalui pengaturan pH, injeksi  $H_2SO_4$  dilakukan hingga *brine* mencapai pH antara 5-6. Hal ini penting karena jika injeksi  $H_2SO_4$  dilakukan secara berlebihan, pH *brine* dapat menjadi terlalu rendah, yang dapat menyebabkan korosi pada pipa. Korosi yang diakibatkan oleh pH yang terlalu rendah dapat menyebabkan kerusakan infrastruktur yang jauh lebih besar daripada masalah *scalling* itu sendiri. Oleh karena itu, pengendalian pH melalui injeksi  $H_2SO_4$  dapat mengurangi risiko pengendapan *silica*, tetapi juga memiliki potensi risiko jika digunakan secara berlebihan [21].

### 3.3. Perbandingan Efektivitas $H_2SO_4$ dengan *Inhibitor antiscalant*

*Inhibitor antiscalant* menunjukkan nilai SSI yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan injeksi menggunakan asam  $H_2SO_4$ . Perbedaan efektivitas ini dapat dijelaskan melalui

beberapa aspek. *Inhibitor antiscalant* berfungsi untuk mencegah pembentukan kristal *silica*, yang berkaitan dengan salah satu faktor penyebab pengendapan *silica*, yaitu salinitas. Sedangkan  $H_2SO_4$  bekerja dengan mengubah kondisi keasaman *brine* (pH). Salah satu alasan mengapa *inhibitor antiscalant* kurang efektif dibandingkan asam  $H_2SO_4$  dalam mencegah pengendapan *silica* adalah karena inhibitor berbasis polimer memiliki stabilitas termal yang terbatas. Oleh karena itu, pada suhu tinggi yang terdapat pada *brine geothermal*, struktur polimer dalam *inhibitor antiscalant* dapat terdegradasi atau mengalami perubahan fisik dan kimia yang mengurangi efektivitasnya [22].

Faktor lain yang memengaruhi efektivitas *inhibitor antiscalant* adalah tingginya konsentrasi *silica* dalam *brine geothermal*. Dalam kondisi *brine* yang memiliki konsentrasi *silica* tinggi ( $> 400 \text{ mg/L SiO}_2$ ), *inhibitor antiscalant* yang berbasis polimer kurang efektif dalam menghambat pembentukan awal *silica* dalam jumlah besar. Hal ini disebabkan oleh cara kerja *inhibitor antiscalant* yang berfokus pada pencegahan di tahap awal pembentukan pengendapan. Namun ketika konsentrasi *silica* sudah sangat tinggi, kapasitas inhibisinya menjadi terbatas [23].

Perbedaan utama dalam mekanisme kerja antara  $H_2SO_4$  dan *inhibitor antiscalant* terletak pada kemampuan  $H_2SO_4$  untuk melarutkan *silica* yang telah terbentuk, sehingga mengurangi kemungkinan pembentukan pengendapan lebih lanjut. Asam sulfat tidak hanya mencegah pembentukan endapan baru tetapi juga dapat melarutkan endapan *silica* yang sudah ada, terutama yang masih dalam bentuk amorf [24].

Sementara itu, *inhibitor antiscalant* lebih berfokus pada pencegahan pembentukan pengendapan di tahap awal daripada melarutkan *silica* yang sudah ada [25]. *Inhibitor scalant* bekerja dengan cara memodifikasi bentuk inti kristal dan mengganggu proses pertumbuhan serta pengendapan yang biasa terjadi. Mekanisme ini dilakukan melalui penghambatan tahap nukleasi di awal pembentukan kristal, sehingga mencegah terbentuknya endapan mineral yang dapat menyumbat sistem [26]. Selain itu, kinerja *inhibitor antiscalant* dapat menurun karena sifat polimernya yang mudah berinteraksi dengan ion-ion kompleks lainnya selain *silica* yang ada dalam *brine geothermal*. *Brine* ini seringkali mengandung beragam kation seperti  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$ , serta anion seperti sulfat. Ion-ion ini dapat berikatan dengan gugus aktif pada inhibitor, yang pada gilirannya mengurangi jumlah situs aktif yang tersedia untuk mengikat *silica*. Sehingga mengurangi ketersediaan situs aktif untuk mengikat *silica* [27].

Meskipun penggunaan asam  $H_2SO_4$  menunjukkan efektivitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan *inhibitor antiscalant* dalam mengurangi risiko munculnya pengendapan *silica*, hasil yang diperoleh dari penggunaan asam  $H_2SO_4$  pada PAD B belum tentu lebih baik daripada penggunaan *inhibitor antiscalant*. Hal ini disebabkan oleh perbedaan dalam sistem operasi dan kondisi sumur yang dapat memengaruhi efektivitas masing-masing jenis inhibitor. Oleh karena itu, saat memilih jenis injektor, penting untuk mempertimbangkan berbagai faktor yang dapat memengaruhi kinerja bahan tersebut.

Setiap sistem di *geothermal* memiliki karakteristik operasional masing-masing, termasuk profil suhu, tekanna, laju alir, dan waktu tinggal yang berebeda. Perbedaan ini dapat mempengaruhi efektivitas relatif dari berbagai metode pengendalian *scaling*. Kemudian kondisi geologis dari sumur yang mencakup komposisi mineral reservoir dan riwayat produksi dapat mempengaruhi respon terhadap berbagai jenis *treatment*. Sumur yang memiliki

kandungan mineral karbonat tinggi mungkin lebih responsif terhadap *treatment* asam. Sedangkan sumur dengan komposisi mineral yang berbeda mungkin memerlukan *treatment* yang berbeda. Variasi dalam komposisi kimia dari *brine* antara lokasi dapat berpengaruh secara signifikan terhadap efektivitas *treatment*. Kandungan ion logam, pH alami, *total dissolved solids* (TDS), dan rasio ion tertentu dapat berperan dalam menentukan metode pengendalian *scaling* yang optimal. Selain itu, jenis material pipa dan peralatan yang digunakan dapat mempengaruhi pilihan *treatment*. Sistem dengan material yang lebih tahan korosi mungkin lebih kuat pada kondisi pH yang lebih rendah. Sedangkan sistem dengan material yang sensitif terhadap korosi memerlukan *treatment* yang lebih konservatif.

Riset terkini memperlihatkan kemajuan dalam penanganan pembentukan *silica scaling*. Studi terbaru mengeksplorasi penggunaan teknologi *digital twins*, *augmented reality*, dan *Internet of Things* (IoT) industri untuk pemantauan dan pengendalian *treatment silica* dari jarak jauh secara langsung. Metode ini memungkinkan penyesuaian perlakuan sesuai dengan kondisi operasi yang berubah-ubah. Selain itu, riset yang dilakukan Watanabe, dkk. (2021) menunjukkan potensi pemanfaatan silika dari *brine* panas bumi untuk membuat silika mesopori [28]. Hal ini dapat mengubah limbah menjadi produk yang memiliki nilai ekonomi tinggi. Keberhasilan sintesis *silica* mesopori dari air panas bumi untuk pertama kalinya membuka kesempatan untuk pendekatan yang lebih ramah lingkungan dalam mengatasi masalah *silica scaling*.

Penelitian dan pengembangan berkelanjutan dalam teknologi untuk pengendalian *silica scaling* tetap diperlukan guna mengoptimalkan efisiensi operasional dan viabilitas ekonomi pada proyek *geothermal*, terutama dengan meningkatnya kompleksitas reservoir *geothermal* yang dieksplorasi.

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan dari analisis mengenai pengaruh jenis *chemical* untuk mencegah pengendapan silika adalah sebagai berikut: penggunaan asam  $H_2SO_4$  efektif dalam menjaga pH tetap asam, sedangkan *inhibitor antiscalant* berbasis polimer mempengaruhi laju pembentukan awal silika. Nilai *Silica Saturation Index* (SSI) terendah pada PAD A dengan  $H_2SO_4$  adalah 0,733, sedangkan pada PAD B dengan *inhibitor antiscalant* adalah 1,043. Faktor yang mempengaruhi pengendapan silika meliputi pH, suhu, dan salinitas, serta perlu mempertimbangkan kondisi sumur, biaya, dan efek samping dalam pemilihan *chemical*.

Saran untuk industri dalam memaksimalkan efektivitas penggunaan inhibitor untuk mencegah pengendapan *silica* dalam sistem pengolahan *brine* meliputi: menguji konsentrasi optimal *inhibitor antiscalant* untuk menurunkan risiko pengendapan ( $SSI < 1$ ), memilih *chemical* yang efektif pada suhu tinggi, dan menambahkan flokulan koagulan untuk meningkatkan pencegahan pengendapan.

## REFERENSI

- [1] L. C. A. Gutiérrez-Negrín, "Evolution of worldwide geothermal power 2020–2023," *Geothermal Energy*, vol. 12, no. 1, 2024.
- [2] N. M. Saptadji, "Karakterisasi Reservoir Menggunakan," *Advanced Geothermal Reservoir Engineering*, hal. 6–17, 2009.
- [3] J. E. Cobos dan E. G. Søgaard, "Chelating agents for diluted geothermal brine reinjection," *Geothermal Energy*, vol. 10, no. 1, hal. 1–19, 2022.
- [4] A. Afriandi dan R. Hantoro, "Analisis Pemanfaatan Geothermal Brine untuk Pembangkitan Listrik dengan Heat Exchanger," *Jurnal Teknik Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, vol. 7, no. 1, hal. 1–6, 2018.
- [5] A. Korzhakov dan S. Oskin, "Thermal protection technology for acoustic–magnetic device in a geothermal water anti-scaling system," *Energies*, vol. 14, no. 19, 2021.
- [6] M. Avicena, "Penentuan Sistem PLTP Berdasarkan Pemanfaatan Brine dari Pad X dan Y," *Jurnal Nasional Pengelolaan Energi Migas*, vol. 1, no. 2, hal. 49–55, 2019.
- [7] W. S. Utami, N. R. Herdianita, dan R. W. Atmaja, "The Effect of Temperature and pH on the Formation of Silica Scaling of Dieng Geothermal Field, Central Java, Indonesia," *Geothermal Reservoir Engineering*, vol. 24–26, hal. 2–7, 2020.
- [8] A. S. Ahmad Sofyan, H. S. A. Hari Sumantri Aka, B. Y. Suranta, dan S. M. A. Ratasya, "Analysis of Scale Saturation Index (SSI), Scale Formation Rate, and Scale Formation Time Based on Geothermal Production Well Head Pressure at Well 'X,'" *Indonesian Journal of Energy Mineral*, vol. 1, no. 1, hal. 26–33, 2021.
- [9] M. A. I. Permana, N. Nandaliarsyad, A. Q. A. Haq, M. Nawansari, dan C. Mulyana, "Kajian Potensi Silica Scaling Pada Pipa Produksi Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (Geothermal)," *Jurnal Material dan Energi Indonesia*, vol. 7, no. 01, hal. 39, 2017.
- [10] J. A. Bush, J. Vanneste, E. M. Gustafson, C. A. Waechter, D. Jassby, C. S., Turchi, T. Y. Cath, "Prevention and management of silica scaling in membrane distillation using pH adjustment," *Journal Membrane Science*, vol. 554, hal. 366–377, 2018.
- [11] J. Yan, X. Tan, dan S. Qi, "High-Temperature-Resistant Scale Inhibitor Polyaspartic Acid-Prolineamide for Inhibiting  $\text{CaCO}_3$  Scale in Geothermal Water and Speculation of Scale Inhibition Mechanism," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 8, 2023.
- [12] Z. Zhang, S. Tang, K. Ge, K. Wang, dan Y. Ji, "High-Efficiency Terpolymer Scale Inhibitor for Obstructing the Formation of Calcium Sulfate by Preventing Crystallization," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 63, no. 26, hal. 11463–11471, Jul 2024.
- [13] A. Aziz dan K. K. Ola, "Kajian Terbentuknya Scaling pada Komponen Turbin Uap Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Skala Kecil Assessment of Scaling Formation on the Steam Turbine Components of Small Scale Geothermal Power Plant," *Jurnal Teknologi Lingkungan*, vol. 20, no. 1, hal. 29–36, 2019.
- [14] S. Bai, J. Han, N. Ao, R. Ya, dan W. Ding, "Scaling and cleaning of silica scales on reverse osmosis membrane: Effective removal and degradation mechanisms utilizing gallic acid," *Chemosphere*, vol. 352, no. February, 2024.
- [15] A. Setiawan, Deris Eko Saputro, dan Agung Nugroho, "Analisis Removal Scaling Silika Pada Jalur Re-Injeksi Brine Pembangkit Listrik Energi Panas Bumi Dengan Menggunakan Asam Fluorida," *Journal of Research and Technology*, vol. 3, no. 1, hal. 19–27, 2017.

- [16] P. Von Hirtz, "Silica scale control in geothermal plants-historical perspective and current technology," hal. 443–476, 2020.
- [17] F. M. Dwiputra, N. Hidayati, dan I. Nuriskasari, "Analisis Silica Saturation Index di Jalur Brine Production Optimization Unit Lapangan Panas Bumi Dieng," hal. 1–4, 2022.
- [18] R. Longval, R. Meirbekova, J. Fisher, dan A. Maignot, "An Overview of Silica Scaling Reduction Technologies in the Geothermal Market," *Energies*, vol. 17, no. 19, 2024.
- [19] P. A. Ibrahim dan A. N. Fajri, "Analisa Laju Pertumbuhan Silica Scaling Pada Pipa Air Kondensat Scrubber Unit 5 di Industri Geothermal," *J. Indones. Sos. Teknol.*, vol. 1, no. 4, hal. 1–9, 2020.
- [20] W. Hater, C. Zum Kolk, C. Dupiron, G. Braun, T. Harrer, dan T. Götz, "Silica scaling on reverse osmosis membranes - Investigation and new test methods," *Desalination Water Treatment*, vol. 31, no. 1–3, hal. 326–330, 2011.
- [21] F. A. Setiawan, E. Rahayuningsih, H. T. B. M. Petrus, M. I. Nurpratama, dan I. Perdana, "Kinetics of silica precipitation in geothermal brine with seeds addition: minimizing silica scaling in a cold re-injection system," *Geothermal Energy*, vol. 7, no. 1, 2019.
- [22] E. Setiososari, "Studi Penggunaan Asap Cair Sebagai Inhibitor Kerak Kalsium Karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) Menggunakan Metode Seeded Experiment," 2018.
- [23] S. Salvador Cob, C. Yeme, B. Hofs, E. R. Cornelissen, D. Vries, F. E. Genceli Güner, G. J. Witkamp, "Towards zero liquid discharge in the presence of silica: Stable 98% recovery in nanofiltration and reverse osmosis," *Separation and Purification Technology*, vol. 140, hal. 23–31, 2015.
- [24] B. Mountain, P. Rendel, dan L. Sajkowski, "CO<sub>2</sub> as an effective silica scaling inhibitor during reinjection of acid-dosed geothermal brines: An experimental study," 2022.
- [25] E. Mavredaki, A. Stathoulopoulou, E. Neofotistou, dan K. D. Demadis, "Environmentally benign chemical additives in the treatment and chemical cleaning of process water systems: Implications for green chemical technology," *Desalination*, vol. 210, no. 1–3, hal. 257–265, 2007.
- [26] K. Popov, M. Oshchepkov, A. Pervov, V. Golovesov, A. Ryabova, M. Trukhina, S. Tkachenko, "A Case Study of Calcium Carbonate Crystallization during Reverse Osmosis Water Desalination in Presence of Novel Fluorescent-Tagged Antiscalants," *Membranes*, vol. 12, no. 2, 2022.
- [27] G. Manfrida, L. Talluri, P. Ungar, C. Zuffi, M. Díaz-Ramírez, H. Leiva, M. Mainar-Toledo, S. Jokull, "Exergo-economic and exergo-environmental assessment of two large CHP geothermal power plants," *Geothermics*, vol. 113, no. September, 2023.
- [28] Y. Watanabe, N. Amitani, T. Yokoyama, A. Ueda, M. Kusakabe, S. Unami, Y. Odashima, "Synthesis of mesoporous silica from geothermal water," *Science Reports*, vol. 11, no. 1, hal. 2–10, 2021.