

## Aplikasi Sensor Temperatur dan Inhibitor *Sodium Lignosulfonate* (SLS) sebagai Solusi Pencegahan serta Monitoring *Silica Scaling* pada Pipa Pembangkit Listrik Geothermal

\***Safira Rahma Kartika, Azkia Najma Firdaus, Deanne Ardelia Zahrani**

Program Studi Geofisika, Universitas Padjadjaran Sumedang Jawa Barat Indonesia

\*Corresponding author : safirarahma253@gmail.com

### Abstract

One of the problems encountered in geothermal exploitation activities is Silica Scaling Rate (SSR). Addressing SSR remains a significant problem, especially during production in geothermal fields with high Silica Saturation Index (SSI). High SSI can lead to silica deposition in pipes. Silica deposition occurs due to temperature drops, pressure decreases, and pH increases. As the temperature drops, the SSR increases, disrupting the fluid flow process from the reservoir. To address this issue, a system was designed to monitor the pipe's condition and trigger SLS injection if the temperature parameter value dropped. SLS functioned by binding silica particles in the fluid, preventing silica from adhering to the pipe walls. This process was carried out by adding SLS chemicals to the fluid flow through the pipes. SLS materials had the ability to bind silica and effectively prevent scale formation. Based on analysis and calculations, a temperature drop was directly proportional to an increase in SSI. A reference temperature of 95°C was used as an indicator for SLS injection because SSI > 1 at this temperature. A dose of 50 ppm SLS was shown to effectively reduce SSI up to 50%, preventing silica scaling in geothermal pipes. This study demonstrates the effectiveness of SLS as a mitigation strategy for silica scaling, offering a cost-efficient and less disruptive solution compared to conventional pipe cutting methods.

**Keywords:** *Silica Scaling,, Inhibitor, Sodium Lignosulfonate*

### Abstrak

Salah satu masalah yang dihadapi pada kegiatan eksplorasi geothermal adalah *Silica Scaling Rate* (SSR). Masalah SSR masih menantang untuk diselesaikan terutama ketika dilakukan saat produksi di lapangan geothermal yang memiliki *Silica Saturation Index* (SSI) tinggi. Tingginya SSI dapat berujung pengendapan silika pada pipa. Pengendapan silika terjadi karena penurunan temperatur, penurunan tekanan, dan kenaikan pH. Apabila temperatur turun maka SSR akan semakin tinggi, sehingga proses aliran fluida dari reservoir menjadi terganggu. Umumnya, solusi untuk mengatasi endapan silika adalah dengan melakukan pemotongan bagian pipa yang terkena endapan, namun hal ini menjadi tindakan ekstrem yang memerlukan biaya dan waktu yang signifikan. Oleh karena itu, diperlukan monitoring kondisi pipa untuk mencegah pengendapan silika dengan lebih efisien tanpa harus memotong pipa. Monitoring kondisi pipa dapat dilakukan dengan instalasi sensor temperatur di sepanjang pipa pada jarak tertentu. Kemudian dibuat sistem jika nilai parameter temperatur turun maka akan diinjeksi SLS. SLS silika berfungsi dengan mengikat partikel silika dalam fluida, sehingga mencegah silika menempel pada dinding pipa. Proses ini dilakukan melalui penambahan bahan kimia SLS ke dalam aliran fluida yang mengalir melalui pipa. Bahan SLS memiliki kemampuan untuk mengikat silika dan secara efektif mencegah terbentuknya endapan. Berdasarkan hasil analisis dan perhitungan, penurunan suhu berbanding lurus dengan peningkatan SSI, suhu referensi 95°C dapat digunakan sebagai indikator injeksi SLS karena SSI > 1 pada suhu tersebut, dan dosis SLS 50 ppm efektif menurunkan SSI hingga 50%, mencegah *Silica Scaling* pada pipa geothermal.

Kata Kunci: *Scaling Silica, , Inhibitor, Sodium Lignosulfonate*

# Aplikasi Sensor Temperatur dan Inhibitor *Sodium Lignosulfonate* (SLS) sebagai Solusi Pencegahan serta Monitoring *Silica Scaling* pada Pipa Pembangkit Listrik Geothermal

## I. PENDAHULUAN

Energi panas bumi merupakan sumber energi terbarukan yang menjanjikan dengan potensi besar di Indonesia. Data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) menunjukkan bahwa Indonesia memiliki potensi panas bumi sebesar 40.000 MW, dengan potensi yang termanfaatkan baru mencapai 2.131 MW pada tahun 2023. Hasil produksi dari panas bumi dapat berupa uap kering (*superheated steam*), uap jenuh (*saturated steam*), dua fasa (*brine*), atau air panas. Di Indonesia, sumber panas bumi yang banyak digunakan adalah air panas bercampur mineral (*brine*) dengan dominasi cair (Permana, M. et al., 2016).

Namun, eksploitasi panas bumi menghadapi berbagai tantangan, salah satunya adalah masalah *Silica Scaling*. *Silica scaling* didefinisikan sebagai pembentukan endapan atau kerak silika pada pipa geothermal (Aziz & Ola, 2019). Kandungan silika yang tinggi dalam fluida geothermal dapat menyebabkan permasalahan kerak pada sumur produksi uap panas bumi dan pipa injeksi *brine*. Akibatnya, pipa injeksi tersumbat dan proses pendistribusian *brine* ke sumur injeksi terganggu (Cano et al., 2022). Kerak silika ini dapat menurunkan efisiensi transfer panas, meningkatkan tekanan balik, dan bahkan menyebabkan kerusakan pipa yang berakibat fatal pada infrastruktur pembangkit listrik tenaga panas bumi. Salah satu contoh kasus yang terkenal adalah di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Dieng, Jawa Tengah, yang mengalami penurunan produksi listrik akibat *Silica Scaling*.



Gambar 1. Silica Scaling pada pipa geothermal (Sumber: Villaseñor, B. L., & Calibugan, A. A., 2011)

Masalah ini semakin kompleks pada lapangan geothermal dengan *Silica Saturation Index* (SSI) tinggi. SSI adalah indikator tingkat kejemuhan silika dalam fluida geothermal. Semakin tinggi SSI, semakin besar potensi pengendapan silika. *Silica Scaling* umumnya dapat dijumpai pada pipa antara daerah *wellhead* dengan separator, *flasher*, pipa *liquid* setelah separator (yang kemudian dibuang ke kolam penampungan) dan sumur injeksi sehingga dapat mengganggu proses operasional pemanfaatan geothermal pada *pipelines*, turbin, maupun sumur injeksi. Pengendapan silika ini dapat terjadi karena adanya penurunan temperatur,

penurunan tekanan, dan kenaikan pH (Permana, M. et al., 2017). Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mencegah dan memantau kerak silika pada pipa geothermal. Umumnya, solusi untuk mengatasi endapan silika adalah dengan melakukan pemotongan bagian pipa yang terkena endapan (Sari et al., 2020). Namun, hal ini dapat menjadi tindakan ekstrem yang memerlukan biaya dan waktu yang signifikan.

Salah satu alternatif yang lebih efisien adalah dengan menggunakan sistem monitoring dan injeksi *Sodium Lignosulfonate* (SLS). SLS bekerja dengan mengikat ion silika dan mencegahnya mengendap pada permukaan pipa. Pemantauan temperatur fluida geothermal di dalam pipa sangat penting untuk memprediksi potensi pembentukan *Silica Scaling*. Sensor temperatur dapat diintegrasikan dengan sistem kontrol untuk secara otomatis menyesuaikan dosis inhibitor (Zhang et al., 2010).

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan gagasan tentang sistem monitoring dan injeksi SLS yang efektif untuk mencegah *Silica Scaling* pada pipa geothermal. Sistem ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi operasi dan mengurangi biaya operasi dan pemeliharaan PLTP.

## II. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan beberapa instrumen untuk membentuk sistem monitoring dan injeksi pencegahan *Silica Scaling* pada pipa geothermal, diantaranya:

1. Sensor temperatur tipe RTD (*Resistance Temperature Detector*) merk Omega PT-100. Sensor ini digunakan untuk memantau temperatur fluida geothermal secara *real-time*. Informasi temperatur ini dimanfaatkan untuk menentukan dosis inhibitor SLS yang tepat dan memantau efektivitas sistem pencegahan *Silica Scaling*. Sensor ini dipilih karena memiliki akurasi tinggi ( $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ), stabilitas tinggi, dan tahan terhadap temperatur ekstrem. Sensor ini memiliki rentang pengukuran dari  $-50^\circ\text{C}$  hingga  $500^\circ\text{C}$ , resolusi  $0.01^\circ\text{C}$ , dan waktu respon 2 detik. Sensor temperatur dipasang pada beberapa titik strategis di pipa geothermal, yaitu *inlet* pipa, *outlet* pipa, sebelum dan sesudah *separator*, serta titik kritis seperti tikungan pipa, katup, maupun area dengan aliran fluida yang lambat. Informasi temperatur *real-time* yang diperoleh dari sensor temperatur dicatat menggunakan *data logger*.
2. Inhibitor *Sodium Lignosulfonate* (SLS). Penelitian ini menggunakan inhibitor SLS merk Aldrich 332997-50G dengan kemurnian 99% untuk mencegah pembentukan *Silica Scaling* pada pipa geothermal. Penambahan SLS ke dalam *brine* bertujuan untuk menurunkan nilai SSI. Dosis SLS yang digunakan adalah 50 ppm, berdasarkan penelitian (Yang et al., 2016) menunjukkan bahwa SLS dapat menurunkan nilai SSI hingga 50%.
3. Pompa Injeksi Grundfos DOSE. Alat ini digunakan untuk menginjeksikan inhibitor SLS ke dalam *brine* dengan dosis tepat. Pompa ini memiliki kapasitas aliran 0-100 ml/min, akurasi  $\pm 1\%$ , dan kontrol dosis manual. Pompa injeksi Grundfos DOSE dipasang di *inlet* pipa pembangkit listrik geothermal dan dihubungkan dengan tangki penyimpanan SLS untuk memastikan pendistribusian SLS yang optimal.

## Aplikasi Sensor Temperatur dan Inhibitor *Sodium Lignosulfonate* (SLS) sebagai Solusi Pencegahan serta Monitoring *Silica Scaling* pada Pipa Pembangkit Listrik Geothermal

4. *Ultrasonic Thickness Gauge High Temperature* (UTG-HT). Alat ukur ketebalan pipa yang dirancang khusus untuk pengukuran pada temperatur tinggi, seperti pada industri geothermal dan petrokimia. Alat ini menggunakan prinsip gelombang ultrasonik untuk mengukur ketebalan dinding pipa dengan akurasi tinggi. Alat ini digunakan untuk memastikan bahwa sistem pencegahan *Silica Scaling* bekerja dengan baik.
5. Pada penelitian kali ini, digunakan referensi *brine* dari penelitian (Permana, M. et al., 2016) sebagai *brine* yang akan peneliti analogikan dalam sistem monitoring dan injeksi pencegahan *Silica Scaling* pada pipa geothermal.

### 2.2.1 Penetapan Temperatur Referensi dan Monitoring *Silica Scaling Index* (SSI)

Untuk menentukan sistem monitoring dan injeksi SLS yang efektif dalam mencegah *Silica Scaling* pada pipa geothermal, diperlukan nilai temperatur referensi. Nilai ini digunakan sebagai acuan untuk menentukan kapan inhibitor SLS perlu diinjeksikan. Temperatur referensi diperoleh dengan melihat kondisi SSI pada *brine* di temperatur tertentu.

SSI dihitung dengan membandingkan konsentrasi silika hasil analisis dengan perhitungan berdasarkan nilai temperatur *brine*. Perhitungan SSI dilakukan menggunakan rumus berikut (Syam, A. et al., 2021):

$$Sol\ SiO_2 = \frac{-731}{10(T^\circ C + 273)} + 452 \quad (1)$$

$$Laju\ Alir\ Massa\ Silika = \frac{Klarutan\ Silika}{10^6} \times M \quad (2)$$

$$V_S = \frac{C \times M}{p} \quad (3)$$

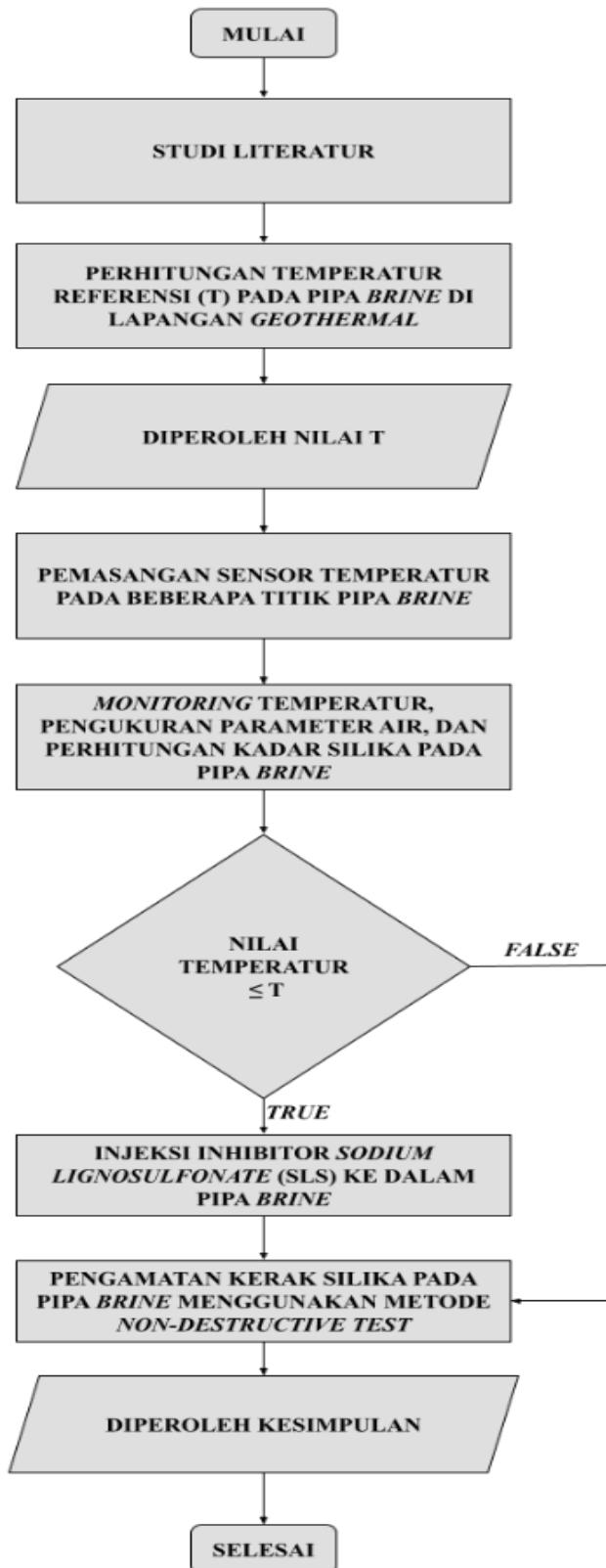
$$V_p = \frac{Volume\ Pipa\ Jalur\ Brine}{V_S} \quad (4)$$

$$SSI = \frac{Konsentrasi\ Silika\ dari\ Analisa}{Konsentrasi\ Silika\ dari\ Perhitungan} \quad (5)$$

SSI dapat diklasifikasikan menjadi tiga bagian, yaitu (Permana, M. et al., 2016):

- a.  $SSI > 1$ , fluida dalam kondisi *supersaturated* dan *Silica Scaling* dimungkinkan terjadi.
- b.  $SSI = 1$ , fluida dalam kondisi *saturated*.
- c.  $SSI < 1$ , fluida dalam kondisi *undersaturated*, sehingga tidak memungkinkan terjadi *Silica Scaling*.

Jika nilai SSI melebihi 1, langkah selanjutnya adalah melakukan injeksi inhibitor SLS ke dalam sistem pipa *brine* pada PLTP. Proses injeksi SLS ini dilakukan dengan menyuntikkan larutan SLS ke dalam aliran *brine* dengan pengaturan yang terkontrol. Larutan SLS kemudian akan tercampur merata di dalam *brine* dan berinteraksi dengan partikel silika, menghalangi mereka untuk mengendap pada permukaan dalam pipa atau bagian lain dari sistem.



Gambar 2. Diagram Alir Metode Penelitian

## Aplikasi Sensor Temperatur dan Inhibitor Sodium Lignosulfonate (SLS) sebagai Solusi Pencegahan serta Monitoring Silica Scaling pada Pipa Pembangkit Listrik Geothermal

Nilai temperatur saat  $SSI = 1$  merupakan nilai temperatur referensi ( $T$ ). Sehingga, saat temperatur mencapai nilai  $T$ , dilakukan injeksi untuk mencegah terbentuknya *Silica Scaling*. Dosis inhibitor SLS ditentukan berdasarkan nilai SSI fluida geothermal dan penelitian (Yang et al., 2016) dengan rumus:

$$\text{Dosis SLS (ppm)} = (SSI - 0.8) \times 100 \quad (6)$$

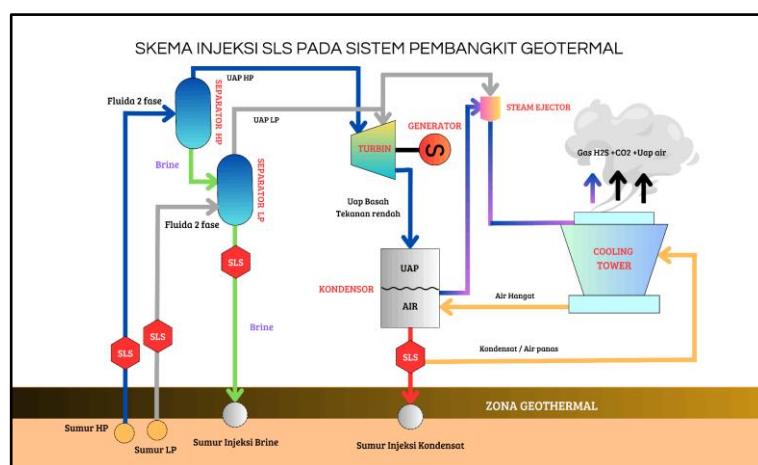
### 2.2.2 Monitoring temperatur, Parameter Air, dan Kadar Silika

Sensor temperatur RTD (*Resistance Temperature Detector*) dipasang pada beberapa titik strategis di pipa *brine* dengan jarak antar sensor tidak lebih dari 10 meter untuk memantau temperatur *brine* secara *real-time*. Pada *brine* geothermal, endapan silika umumnya mulai terjadi pada temperatur yang lebih rendah daripada air geothermal biasa karena konsentrasi silika dalam *brine* biasanya lebih tinggi. Temperatur referensi ( $T$ ) menjadi acuan untuk memantau temperatur dan mencegah terbentuknya *Silica Scaling*.

Monitoring temperatur, pengukuran parameter air, dan perhitungan kadar silika pada pipa geothermal dilakukan secara berkala. Data temperatur *brine* dicatat dan dianalisis untuk menentukan tingkat SSI dan memastikan sistem pencegahan *Silica Scaling* bekerja efektif.

### 2.2.3 Monitoring Efektivitas Inhibitor SLS

Efektivitas inhibitor SLS dalam mencegah *Silica Scaling* dipantau menggunakan metode *non-destructive test*. Metode yang digunakan adalah ultrasonik, di mana gelombang suara frekuensi tinggi ditransmisikan ke dalam material pipa untuk mengidentifikasi perubahan sifat material. Gelombang suara dipancarkan ke dalam material dan pantulannya diukur untuk menentukan ketebalan material dan keberadaan cacat. Silika yang menumpuk di dalam pipa dapat mengurangi kecepatan gelombang suara, sehingga metode ultrasonik dapat digunakan untuk mendeteksi *Silica Scaling*.



Gambar 3. Skema Injeksi SLS pada Sistem Pembangkit Geothermal (Saptadji, 2012)

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Temperatur referensi untuk injeksi SLS ditentukan berdasarkan nilai *Silica Saturation Index* (SSI) pada *brine*. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Permana, M. et al., 2016, diperoleh hasil perhitungan SSI pada tabel berikut.

Tabel 1. Tabel Perhitungan SSI (Sumber: Permana, M. et al., 2016)

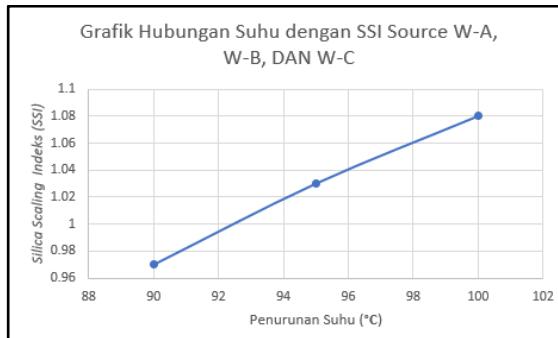
Source	T_source (°C)	Separator	T_final (°C)	Cl (ppm)	pH	SSI
W-A	270	SP-A	170	995	6.3	1.08
W-B	270	SP-B	175	995	6.3	1.03
W-C	270	SP-C	180	995	6.3	0.97
SP-A	170	F-A	120	995	6.3	1.55
SP-B	175	F-B	120	995	6.3	1.57
SP-C	180	F-C	120	995	6.3	1.58

Berdasarkan data yang diperoleh dari Tabel 1, dapat dihitung nilai penurunan temperatur ( $\Delta T$ ) dari setiap  $T_{source}$  ke  $T_{final}$ , seperti pada Tabel 2. Sehingga diperoleh grafik hubungan perubahan temperatur dengan nilai SSI seperti pada Gambar 4 dan Gambar 5.

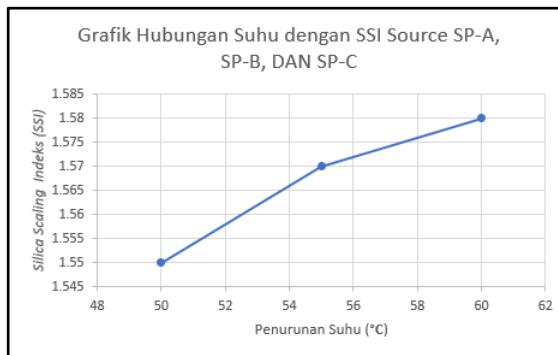
Tabel 2. Data Hasil Penentuan Nilai temperatur Referensi (T)

Source	T_source (°C)	Separator	T_final (°C)	Penurunan temperatur ( $\Delta T$ )	SSI
W-A	270	SP-A	170	100	1.08
W-B	270	SP-B	175	95	1.03
W-C	270	SP-C	180	90	0.97
SP-A	170	F-A	120	50	1.55
SP-B	175	F-B	120	55	1.57
SP-C	180	F-C	120	60	1.58

## Aplikasi Sensor Temperatur dan Inhibitor *Sodium Lignosulfonate* (SLS) sebagai Solusi Pencegahan serta Monitoring *Silica Scaling* pada Pipa Pembangkit Listrik Geothermal



Gambar 4. Grafik Hubungan Penurunan temperatur dengan Nilai SSI



Gambar 5. Grafik Hubungan Penurunan temperatur dengan Nilai SSI

Berdasarkan grafik hubungan penurunan temperatur dengan nilai SSI didapatkan bahwa semakin besar penurunan temperatur yang terjadi pada  $T_{source}$  ke  $T_{final}$  maka akan semakin besar nilai SSI. Sehingga antara temperatur dan SSI memiliki hubungan berbanding lurus.

SSI dihitung dengan menggunakan data dari penelitian Permana, M. et al (2016). Data tersebut menunjukkan bahwa nilai  $SSI > 1$  ketika terjadi perubahan temperatur ( $\Delta T$ ) sebesar  $95^{\circ}\text{C}$ . Hal ini menunjukkan bahwa pada temperatur tersebut, fluida berada dalam kondisi *supersaturated* dan mungkin terjadi *Silica Scaling*. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan penggunaan temperatur  $95^{\circ}\text{C}$  dijadikan sebagai acuan untuk menentukan waktu injeksi SLS.

Dalam penelitian ini, dosis SLS yang diterapkan adalah sebesar 50 ppm. Hal ini mengindikasikan bahwa SLS mampu menurunkan nilai SSI hingga 50%. Penggunaan dosis ini dipilih dengan harapan memberikan efektivitas yang maksimal dalam mencegah terjadinya *Silica Scaling*.

Penelitian ini memperkenalkan sistem monitoring dan injeksi SLS untuk mencegah *Silica Scaling* pada pipa geothermal. Sistem ini terdiri dari sensor RTD yang dipasang secara strategis untuk memantau temperatur *brine* secara *real-time* dan injeksi SLS yang dilakukan pada temperatur  $95^{\circ}\text{C}$ . Efektivitasnya dapat dipantau dengan metode *non-destructive test* seperti ultrasonik, yang telah terbukti efektif dalam memantau ketebalan pipa geothermal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan SLS tidak

menyebabkan perubahan signifikan pada ketebalan pipa, menegaskan efektivitas sistem ini dalam mencegah pembentukan *Silica Scaling* pada pipa geothermal.

#### **IV. KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil dan pembahasan penelitian, dapat disimpulkan bahwa:

1. Hubungan antara penurunan temperatur dan nilai SSI berbanding lurus, hal tersebut menunjukkan bahwa temperatur dan SSI penting dalam menentukan potensi *Silica Scaling* pada pipa geothermal.
2. Temperatur referensi 95°C bisa digunakan untuk menentukan waktu injeksi SLS karena pada temperatur tersebut, nilai SSI > 1, menandakan risiko tinggi terjadinya *Silica Scaling*.
3. Dosis SLS 50 ppm efektif untuk mencegah *Silica Scaling*, berdasarkan penelitian yang menunjukkan penurunan nilai SSI hingga 50%.

Berdasarkan hasil penelitian ini, disarankan untuk menerapkan sistem monitoring dan injeksi SLS pada PLTP untuk mencegah *Silica Scaling*. Sistem ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi operasi dan mengurangi biaya operasi dan pemeliharaan PLTP.

Penting juga untuk melakukan penelitian lebih lanjut untuk memverifikasi nilai temperatur referensi dan dosis SLS dengan data lapangan. Penelitian juga perlu dilakukan untuk mempelajari pengaruh faktor lain, seperti kadar silika dan pH, terhadap efektivitas SLS.

#### **V. DAFTAR PUSTAKA**

- Andalucia, S. & Wibowo, R. (2023). Downhole Monitoring Sumur Geothermal dengan Metode Pressure Temperature Shut-In Sumur SR 1#2 di PT. Pertamina Geothermal Energy Area Lumut Balai. *Jurnal Cakrawala Ilmiah*, Vol.3(4) hal: 1289-1304.
- Azhar, M. F., Nuriskasari, I., & Hidayati, N. (2021). Analisa Silica Scaling Pada Sistem Dual Flash Production Optimization Unit di PLTP Dieng. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta*, (pp. 1670-1675).
- Aziz, Amiral, & Ola, Kornelis K. (2019). Kajian Terbentuknya *Scaling* pada Komponen Turbin Uap Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Skala Kecil. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 20(1), hal: 29–36.
- Ghoreishi, M., Vakilabad, M., et all. (2019). Analysis, economical and technical enhancement of an organic Rankine cycle recovering waste heat from an exhaust gas stream. *Energy Science & Engineering*.
- Hadi, B. F. Prasetyo. (2019). Rumusan Konseptual Neraca Massa sebagai Alternatif untuk Monitoring Laju Massa Produksi di Titik Separator Fluida Dua Fasa Panasbumi. *Jurnal Teknologia*. Vol. 2, No. 1, hal:47-58.

## **Aplikasi Sensor Temperatur dan Inhibitor Sodium Lignosulfonate (SLS) sebagai Solusi Pencegahan serta Monitoring Silica Scaling pada Pipa Pembangkit Listrik Geothermal**

- Herianto, Kristiati, M. Th., Bintarto, B., & Asmorowati, D. (2020). Analisa Indikasi Pembentukan Scaling Berdasarkan Simulasi Numerik Sumur Panas Bumi (pp. 1-7). *Yogyakarta: Pengembangan Teknologi Kimia untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia – UPN "Veteran" Yogyakarta.*
- Ibrahim, P. J. & Fajri, A. N. (2020). Analisa Laju Pertumbuhan Silica Scaling pada Pipa Air Kondensat Scrubber Unit 5 di Industri Geothermal. *Jurnal Indonesia Sosial Teknologi, Vol. 1, No. 4*, hal: 285-295.
- Luis C.A., Felix, I.C., M. Jose., & L. Jose. (2020). Geothermal energy in Mexico: update and perspectives. *Proceedings World Geothermal Congress 2020 Reykjavik, Iceland.*
- Manyoe, I. N., & Hutagalung, R. (2020). Subsurface Shallow Modelling Based on Resistivity Data in The Hot Springs Area of Libungo Geothermal, Gorontalo. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology, 5(2)*, hal: 87-93.
- Permana, M. Aril. I. et al. (2016). Kajian Silica Scaling pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (Geothermal). *Proseding Seminar Nasional Fisika dan Aplikasinya, Vol. 39, No. 1*, p. 012052.
- Polimpung, P. W., Taunaumang, H., & Polii, J. (2021). Analisis terjadinya Scaling Silica pada Condenser dan Cooling Tower. *Jurnal Fista: Fisika dan Terapannya, Vol. 2, No. 1*, hal: 38-42.
- Relindo, I. (2021). *Penentuan Karakteristik Reservoir Panas Bumi dengan Analisis Metode Geokimia Fluida Manifestasi dan Sumur Lapangan Panas Bumi Berdasarkan Analisis pH, Ion Balance, CL-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> dan Na-K-Mg*. Lampung: Skripsi Teknik Geofisika, Universitas Lampung.
- Sari et al. (2021). Analisis Efektivitas Pembersihan Endapan Silika pada Permukaan Pipa Baja Karbon dengan Metode Mekanik dan Kimia. Bandung: *Jurnal Teknologi Rekayasa Industri, Vol. 16(1)*, hal: 1-8.
- Sihombing, C. (2020). *Analisa Efisiensi Termal Turbin, Kondensor dan Menara Pendingin pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi*. Majalah Ilmiah Swara Patra. 10(1).
- Sofyan, A. (2021). 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 and Mineral. Vol. I*, hal. 26-33.
- Syam, N. A., Husain, H., & Pasaribu, M. (2021). *Pengaruh temperatur terhadap Pembentukan Silika (SiO<sub>2</sub>) Scaling pada Jalur Pipa brine Separator Pembangkit Listrik tenaga Panas Bumi* (pp. 442-445). Makassar : Teknologi Industri VIII.
- Ulya, M. Ridho, Suhamranto, Saaduddin, & Supriyadi, D. (2023). Effect of pH and Surfactant Concentration Sodium Lignosulfonate (SLS) towards Reduction of Silica Mass from Geothermal Brine. *Jurnal Geocelebes. Vol. 7 No. 1*, 37-43.

Tolodo, D.D., Usman, F.C.A., Manyoe, I.N., Gaib, F.A., Putje, F.H., & Ibrahim, Y. (2019). Geologi Daerah Geothermal Pangi Kabupaten Bone Bolango Provinsi Gorontalo. *Jambura Geoscience Review*, 1(1), 22-29.

Yang, F., et al. (2016). Study on the Inhibition Effect of Sodium Lauryl Sulfate (SLS) on silica scaling in geothermal brine. *Desalination and Water Treatment*, 57(15), 5892-5900.

Zhang et al. (2010). *Experimental Study of Sodium Lignosulfonate as a Silica Scale Inhibitor in Simulated Geothermal Brine*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 49(22), pp. 10434-1