



PERHITUNGAN LAJU PEMBENTUKAN *SILICA SCALING* PADA *PIPELINE PANAS BUMI SUMUR F*

Febrianda Ahsan Sidiq^{1*}, Henk Subekti¹, Yayas Cahya²

¹Teknik Produksi Migas, PEM Akamigas Cepu, Jl. Gajah Mada No.38, Mentul, Karangboyo, Kec. Cepu, Kabupaten Blora, Jawa Tengah 58315, Indonesia

²Pertamina Geothermal Energy Karaha Bodas Area, Jl. Karaha Bodas, Kp. Ciselang, RT 03/03, Kec. Kadipaten, Kabupaten Tasikmalaya, Jawa Barat 46157, Indonesia

* *febriandaahsansidiq@gmail.com*

ABSTRAK

Indonesia memiliki potensi besar sumber daya energi panas bumi, yang dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik. Meskipun energi panas bumi tersedia secara luas, pengekstraksian dan pemanfaatannya memerlukan pemahaman mengenai karakteristik fluida serta tantangan seperti pengendapan kerak (scale) yang dapat menghambat efisiensi pembangkit. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis laju pembentukan silika scale pada sumur produksi panas bumi F, sehingga dapat ditentukan waktu yang tepat untuk melakukan perawatan pipa untuk mempertahankan produksi. Dengan pemahaman yang baik mengenai dinamika pembentukan scale, diharapkan potensi panas bumi Indonesia dapat dimanfaatkan secara optimal. Data diolah dengan menerapkan persamaan *Silica Saturation Index* (SSI) untuk memprediksi pembentukan silika scale dalam sistem panas bumi. Nilai SSI yang lebih besar dari 1 mengindikasikan potensi tinggi terjadinya silika scaling. Nilai SSI pada sumur F menurun dari 3,41 menjadi 1,28 seiring waktu, menunjukkan bahwa konsentrasi silika awalnya meningkat tapi kemudian berkurang saat kesetimbangan saturasi tercapai. Laju pembentukan silika scale (St) juga menurun dari 4,925 inci/tahun menjadi 1,844 inci/tahun, yang berkorelasi dengan penurunan nilai SSI. Perkiraan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 25% diameter pipa (t25%) awalnya menurun dari 1,370 tahun menjadi 0,812 tahun, lalu secara umum meningkat hingga 2,169 tahun, sejalan dengan penurunan St dan SSI.

Kata kunci: *Panas Bumi, Silica Scaling, Pipeline, Silica Saturation Index*

ABSTRACT

Indonesia has great potential for geothermal energy resources, which can be utilized for power generation. Although geothermal energy is widely available, its extraction and utilization require an understanding of the fluid characteristics as well as challenges such as scale deposition that can decrease the efficiency of the plant. This study aims to analyze the rate of silica scale formation in geothermal production well F, to determine the appropriate interval to perform pipeline maintenance to maintain production. With a good understanding of the dynamics of scale formation, it is expected that Indonesia's geothermal potential can be optimally utilized. Data were processed by applying the Silica Saturation Index (SSI) equation to predict the formation of silica scale in geothermal systems. SSI values greater than 1 indicate a high potential for silica scaling. The SSI value in well F decreased from 3.41 to 1.28 over time, indicating that the silica concentration initially increased but then decreased as saturation equilibrium was reached. The silica scale formation rate (St) also decreased from 4.925 inches/year to 1.844 inches/year, which correlates with the decrease in SSI value. The estimated time taken to reach 25% of the pipe diameter (t25%) initially decreased from 1.370 years to 0.812 years, and then generally increased to 2.169 years, in line with the decrease in St and SSI.

Keywords: *Geothermal, Silica Scaling, Pipeline, Silica Saturation Index*

1. PENDAHULUAN

Energi telah menjadi kebutuhan dasar dan pendorong ekonomi untuk mencapai energi yang adil dan masyarakat sejahtera. Pengelolaan energi penting untuk mendukung peningkatan ketahanan energi nasional, guna mencapai kemandirian energi dengan memanfaatkan potensi sumber daya energi dalam negeri. Indonesia memiliki potensi sumber daya energi yang sangat besar dan beragam, bukan hanya energi fosil tetapi juga energi terbarukan seperti panas bumi. Indonesia memiliki potensi panas bumi terbesar di dunia, dengan sumber daya sebesar 11.073 MW dengan cadangan sebesar 17.506 MW [1]. Pemerintah Indonesia telah menetapkan target energi panas bumi untuk berkontribusi sebesar 9,7% pada bauran energi pada tahun

2050, sebuah target yang peningkatan yang signifikan dari kontribusi 5,4% pada tahun 2023 [2]. Pada tahun 2050, diperkirakan bahwa 59% dari Potensi panas bumi Indonesia akan dimanfaatkan [3].

Energi panas bumi secara sederhana berarti energi panas alami yang berasal dari dalam bumi. Meskipun energi panas bumi umumnya merujuk pada seluruh panas yang ada di dalam bumi, bagian yang dapat diekstrak dan dimanfaatkan oleh manusia lebih spesifik [4]. Untuk memanfaatkan energi panas bumi, fluida yang ada didalamnya perlu diproduksi. Fluida yang diproduksi kemudian dialirkan melalui *pipeline* untuk menghasilkan listrik, biasanya dengan memisahkan komponen uap fluida dan mengalirkannya melalui turbin di pembangkit listrik, seperti ditunjukkan pada Gambar 1 [5].



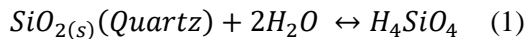
Gambar 1. Pipeline Pada Sumur

Fluida yang diproduksi di reservoir mengalir ke sistem sumur produksi, di mana fluida tersebut dipisahkan menjadi dua fasa, yaitu air dan uap. Uap diarahkan ke sistem produksi, sedangkan air diarahkan ke sistem *brine*. Di dalam sumur produksi dan sistem produksi, fluida mempertahankan tekanan dan temperatur yang tinggi, tetapi di dalam sistem *brine*, suhu secara bertahap menurun, dan tekanan menurun ke tingkat atmosfer [6].

Dalam sistem panas bumi, kandungan kimia pada brine dapat mempengaruhi efisiensi pembangkit listrik melalui pengendapan kerak (*scale*). Berbagai faktor menyebabkan pengendapan silika (*silica scaling*), yang meliputi perubahan suhu dan tekanan, kecepatan aliran (*flowrate*), tingkat pH, tingkat kejenuhan, dan keberadaan ion-ion dalam larutan [7].

Senyawa silika memiliki beberapa bentuk, yaitu *quartz*, *crystalite*, *amorphous si-*

lica, chalcedony, dll. Dalam analisis potensi pembentukan silika, digunakan dua bentuk yang relevan, yaitu *quartz* dan *amorphous silica*. Di dalam reservoir panas bumi terdapat kesetimbangan silika dalam bentuk kuarsa sesuai dengan persamaan reaksi kimianya, sebagai berikut [8],



Silica scale dapat mempengaruhi peralatan permukaan, seperti *heat exchanger*, *separator*, dan *pipeline*, sehingga menghambat perpindahan panas, mengurangi efisiensi, dan menyebabkan masalah operasional yang signifikan, seperti ditunjukkan pada Gambar 2 [9]. Untuk mencegah masalah ini, seringkali dilakukan injeksi bahan kimia penghambat pembentukan *scale* (*scale inhibitor*) pada sumur maupun *pipeline*. Bahan kimia tersebut menjaga komponen penyusun *scale* tetap terlarut, sehingga pembentukan *scale* tidak akan terjadi [10].



Gambar 2. Silica Scale Pada Pipa

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui laju pembentukan *scaling* yang terjadi pada sumur F dan memprediksi waktu terbentuknya *scale*. Sehingga, diharapkan dengan mengetahui seberapa tinggi laju pembentukan *silica scale* tersebut, maka dapat ditentukan kapan harus melakukan perawatan pada pipeline agar *silica scale* yang terbentuk tidak akan merusak pipa, sehingga jumlah produksi dapat dipertahankan.

2. METODE

Sumur panas bumi F merupakan sumur produksi dengan sistem panas bumi yang didominasi oleh air (*water dominated*) dengan temperatur berkisar pada 187.3 °C. Sumur ini memiliki ketinggian pada 1437 mdpl. Sumur ini memiliki diameter pipa sebesar 16” untuk mendistribusikan fluida menuju pembangkit. Penelitian ini memakai metode kuantitatif dengan mengolah data primer berupa komposisi kimia fluida, pH, dan temperatur pada sumur F pada waktu yang berbeda untuk menunjukkan tren pembentukan *silica scale* yang terjadi.

Tabel 1. Data Sumur F

Sumur	D _{pipa} (in)	T _{sumur} (°C)	Cl (ppm)	SiO ₂ (ppm)	pH
F	16	187.3	49515.13	31.6438	3.41
			27171.73	774.1786	4.78
			870.8323	409.8271	5.33
			4112.847	26.16513	5.54
			2597.82	15.64986	5.77
			424.2465	5.688314	6.28

Tabel 1 merupakan data sumur F. Data diolah dengan menerapkan persamaan *silica saturation index* (SSI). *Silica Saturation Index* (SSI) adalah parameter penting dalam memahami dan memprediksi pembentukan *silica scale* dalam sistem panas bumi. Nilai SSI memberikan ukuran potensi pengendapan silika berdasarkan konsentrasi silika terlarut dan kelarutannya dalam kondisi tertentu. Kelarutan silika dalam air bergantung pada temperatur, temperatur yang lebih tinggi menghasilkan peningkatan kelarutan. Kelarutan silika pada temperatur reservoir >185°C biasanya dikontrol oleh *quartz*, sedangkan kelarutan pada suhu <185°C dapat dikontrol oleh *chalcedony*. Garam terlarut dan pH juga mempengaruhi kelarutan silika. Silika lebih mudah larut dalam kondisi yang sangat asam (pH <3) dan sangat basa (pH >10). Kelarutan *amorphous silica* meningkat seiring dengan meningkatnya suhu, sementara kelarutannya relatif konstan pada kisaran pH 5,5-8,5 [11]. Berikut klasifikasi nilai SSI :

- SSI > 1, Terbentuk fluida *supersaturated*, *scaling* sangat mungkin terjadi.

- SSI = 1, Terbentuk fluida *saturated*.
- SSI < 1, Terbentuk fluida *undersaturated*, *scaling* tidak mungkin terjadi.

Berikut persamaan SSI yang akan digunakan :

$$SSI = \frac{Q(t_1, m)}{[s(T, m)(1-x_2)]} \quad (2)$$

Dimana,

$$Q(t_1, m) = Q \cdot F(t_1, m) \quad (3)$$

$$F(t_1, m) = 1 - 0.2m (1 - 0.3363t^{0.1644}) \quad (4)$$

$$m = \frac{el}{35.5 \times 1000} \quad (5)$$

$$S(T, m) = s \cdot 10^{-mD(t)} \quad (6)$$

$$\text{Log } s = 4.52 - \frac{751}{t+273} \quad (7)$$

$$\text{Log } D(t) = -1.0596 - 0.001573t \quad (8)$$



Gambar 3. Ilustrasi Pertumbuhan Silica Scale Pada Pipa

Ilustrasi pertumbuhan silica scale pada pipa ditunjukkan pada Gambar 3. Laju peningkatan *silica scaling* berbanding lurus dengan penurunan temperatur dan peningkatan pH dikarenakan proses *flashing*. Sehingga, perkiraan waktu *silica scaling* dapat menyumbat pipa hingga 25% dari diameter pipa semula dapat diketahui dengan menerapkan persamaan berikut,

$$St = \frac{[Q(t_1,m) - s(t_2,m)]}{1743 \times \rho_{silica}} \times 365 \quad (9)$$

$$t_{25\%} = \frac{D}{4 \times St} \quad (10)$$

3. PEMBAHASAN

Setelah dilakukan perhitungan nilai SSI pada sumur F, didapatkan nilai SSI secara berturut-turut sebesar 2.02, 3.42, 3.13, 1.94, 1.72, dan 1.28, seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Hal ini mengindikasikan bahwa sumur ini sangat berpotensi untuk mengalami *silica scaling* dikarenakan nilai SSI yang didapat > 1 . Nilai SSI dalam tabel menurun dari waktu ke waktu dari 3,41 menjadi 1,28. Dapat diamati bahwa pada awalnya, konsentrasi silika meningkat dari waktu ke waktu, sehingga men-

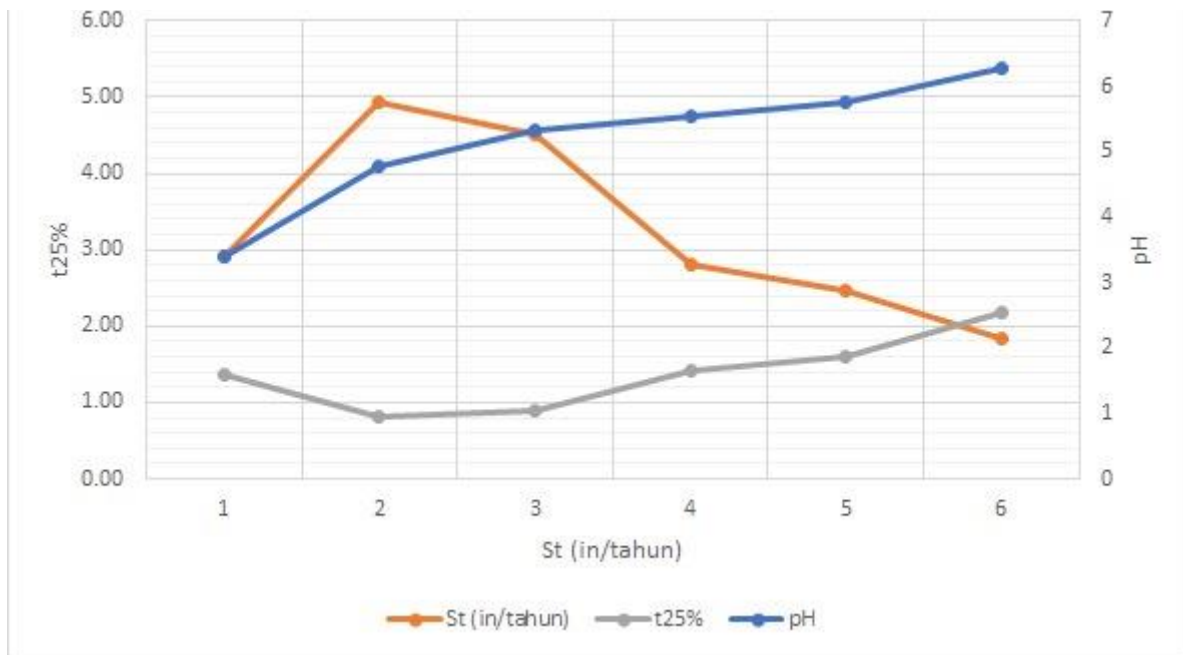
orong pembentukan scale. Namun, ketika SSI mendekati 1, solubility bergerak mendekati kesetimbangan saturasi, mengurangi potensi pembentukan silika dikarenakan konsentrasi silika berkurang.

Laju pembentukan *silica scale* (St) dinyatakan dalam satuan "in/tahun" menurun seiring waktu, dari 4,925 inci/tahun menjadi 1,844 inci/tahun, seperti pada Gambar 3. Penurunan St ini berkorelasi dengan penurunan SSI, yang menunjukkan bahwa ketika fluida bergerak mendekati kejenuhan, laju pembentukan silica scale menurun. Penurunan St yang signifikan dari waktu ke waktu menyiratkan perubahan pH, konsentrasi silika, atau faktor lainnya.

Besaran $t_{25\%}$ menyatakan perkiraan waktu (dalam tahun) yang diperlukan untuk pembentukan silica scale mencapai 25% dari diameter pipa. Nilai-nilai tersebut menunjukkan beberapa variasi, awalnya menurun dari 1,370 tahun (1 tahun 4 Bulan 15 hari) menjadi 0,812 tahun (9 bulan 24 hari), dan kemudian secara umum meningkat dari waktu ke waktu, mencapai 2,169 tahun (2 tahun 2 bulan 16 hari). Tren ini menunjukkan bahwa dengan menurunnya St , dibutuhkan waktu yang lebih lama untuk mencapai ketebalan *silica scale* sebesar 25%, yang sejalan dengan penurunan nilai SSI dan St .

Tabel 2. Hasil Perhitungan

SSI	St (in/tahun)	$t_{25\%}$
2.02	2.920	1.370
3.41	4.925	0.812
3.13	4.526	0.884
1.94	2.801	1.428
1.72	2.479	1.614
1.28	1.844	2.169



Gambar 3. Grafik Laju Pembentukan Scale (St) dan Waktu Pembentukan Scale Mencapai 25% (t_{25%}) Terhadap pH

Untuk mempertahankan jumlah produksi yang optimum, diperlukan pemeliharaan terhadap *pipeline* sumur F selama kurang dari waktu yang telah diperkirakan. Perawatan yang dapat dilakukan diantaranya yaitu melakukan *acidizing* maupun penambahan *scale inhibitor* pada sumur F ataupun pada *pipeline*.

4. SIMPULAN

Setelah penelitian dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan :

1. Sumur F ini merupakan sumur produksi dengan dominasi air (*Water dominated*) dengan temperatur sebesar 187.3 °C. Suhu ini didapat akibat dari proses *flashing* yang terjadi di reservoir
2. Nilai pH pada awalnya sebesar 3,41 meningkat dari waktu ke waktu menjadi 6,28, yang menyebabkan tingginya konsentrasi silika, hal ini disebabkan oleh proses *flashing* yang terjadi di reservoir. Namun, konsentrasi silika menunjukkan adanya penurunan, yang menunjukkan adanya kemungkinan bahwa sumur ini sempat dilakukan *acidizing*.
3. Diperoleh nilai SSI secara berturut-turut sebesar 2.02, 3.42, 3.13, 1.94, 1.72, dan 1.28, mengindikasikan bahwa sumur ini sangat berpotensi untuk mengalami *silica*

scaling dikarenakan nilai SSI yang didapat > 1. Nilai SSI dalam tabel menurun dari waktu ke waktu dari 3,41 menjadi 1,28. Dapat diamati bahwa pada awalnya, konsentrasi silika meningkat dari waktu ke waktu, sehingga mendorong pembentukan *scale*. Namun, ketika SSI mendekati 1, *solubility* bergerak mendekati kesetimbangan saturasi, mengurangi potensi pembentukan silika dikarenakan konsentrasi silika berkurang.

4. Laju pembentukan *silica scale* menurun seiring waktu, dari 4,925 in/tahun menjadi 1,844 in/tahun. Penurunan St ini berkorelasi dengan penurunan SSI, yang menunjukkan bahwa ketika fluida bergerak mendekati kejenuhan, laju pembentukan *silica scale* menurun. Penurunan St yang signifikan dari waktu ke waktu menyiratkan perubahan pH, konsentrasi silika, atau faktor lainnya.
5. Perkiraan waktu (dalam tahun) yang diperlukan untuk pembentukan *silica scale* mencapai 25% dari diameter pipa. Nilai-nilai tersebut menunjukkan beberapa variasi, awalnya menurun dari 1,370 tahun (1 tahun 4 Bulan 15 hari) menjadi 0,812 tahun (9 bulan 24 hari), dan kemudian secara umum meningkat dari waktu ke waktu, mencapai 2,169 tahun (2 tahun 2

bulan 16 hari). Tren ini menunjukkan bahwa dengan menurunnya St , dibutuhkan waktu yang lebih lama untuk mencapai ketebalan *silica scale* 25%, yang sejalan dengan penurunan nilai SSI dan St .

6. Diperlukan perawatan terhadap sumur, seperti *acidizing*, dsb selama kurang dari waktu yang telah diperkirakan agar jumlah produksi dapat dipertahankan

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Direktorat Panas Bumi, *POTENSI PANAS BUMI INDONESIA JILID 1*. 2017.
- [2] PLN, “Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030.,” *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik. 2021-2030*, pp. 2019–2028, 2021, [Online]. Available: <https://web.pln.co.id/stakeholder/ruptl>
- [3] Peraturan Presiden Republik Indonesia, “Rencana Umum Energi Nasional,” 2017.
- [4] A. Zarkasyi Andri Eko Ari Wibowo Arif Munandar Asep Sugianto Dedi Kusnadi Dikdik Risdianto Edi Suhanto Lano Adhitya Permana Mochamad Nur Hadi Rina Wahyuningsih Robertus Simarmata Sabtanta Joko Suprpto Sri Widodo Tony Rahadinata Yuanno Rezky *et al.*, *BUKU PANDUAN PENYELIDIKAN PANAS BUMI*, vol. 40254, no. 444.
- [5] J. Jamero, S. J. Zarrouk, and E. Mroczek, “Mineral scaling in two-phase geothermal pipelines: Two case studies,” *Geothermics*, vol. 72, no. October 2017, pp. 1–14, 2018, doi: 10.1016/j.geothermics.2017.10.015.
- [6] X. Kong and Y. Zhang, “Water–Rock Interactions, Genesis Mechanism, and Mineral Scaling of Geothermal Waters in Northwestern Sichuan, SW China,” 2023.
- [7] R. Longval, R. Meirbekova, J. Fisher, and A. Maignot, “An Overview of Silica Scaling Reduction Technologies in the Geothermal Market,” *Energies*, vol. 17, no. 19, 2024, doi: 10.3390/en17194825.
- [8] A. S. Akhmad Sofyan, H. S. A. Hari Sumantri Aka, B. Y. Suranta, and 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,’” *Indones. J. Energy Miner.*, vol. 1, no. 1, pp. 26–33, 2021, doi: 10.53026/ijoem/2021/1.1/15.
- [9] S. J. Zarrouk, B. C. Woodhurst, and C. Morris, “Silica scaling in geothermal heat exchangers and its impact on pressure drop and performance: Wairakei binary plant, New Zealand,” *Geothermics*, vol. 51, pp. 445–459, 2014, doi: 10.1016/j.geothermics.2014.03.005.
- [10] M. A. I. PERMANA, “Kajian Potensi Silica Scaling Pada Pipa Produksi Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (Geothermal),” *J. Mater. dan Energi Indones.*, vol. 7, no. 01, p. 39, 2017, doi: 10.24198/jmei.v7i01.12255.
- [11] P. Von Hirtz, *Silica scale control in geothermal plants-historical perspective and current technology*. 2016. doi: 10.1016/B978-0-08-100337-4.00016-4.

Daftar Simbol

MW	= Megawatt
$Q(t_1, m)$	= Kelarutan <i>quartz</i> pada temperatur <i>reservoir</i> (t_1) dan salinitas ”m”
$s(T, m)$	= Kelarutan <i>amorf</i> pada temperatur flashing dan salinitas ”m”
$F(t, m)$	= Faktor pengaruh salinitas
m	= Salinitas (molal)
Cl	= Solubilitas Cl (ppm)
X_2	= Kualitas uap setelah <i>flashing</i>
St	= Laju pembentukan <i>silica scaling</i> (in/tahun)
ρ_{silica}	= Massa jenis <i>silica</i> = 43,442 g/in ³
D	= Diameter pipa (in)
$t_{25\%}$	= Perkiraan waktu <i>silica scale</i> akan menyumbat pipa hingga 25%