

PERBANDINGAN METODE PENCEGAHAN DAN PENANGANAN SILICA SCALING DI BERBAGAI LAPANGAN GEOTHERMAL

Muhamad Iqbal¹, Akhmad Sofyan^{1,2*}, Diyah Rosiani¹, Muhammad Raynaldi²

¹JTeknik Produksi Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Cepu Jl. Gajah Mada No.38 Blora, 58315

²Program Studi Geologi, Fakultas Ilmu Kebumihan, Universitas Szeged 13 Dugonics Square, Szeged, 6720

*E-mail: akhmad@esdm.go.id

ABSTRAK

Silica scaling menjadi hambatan kritis dalam operasi pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) karena mengendapkan silika amorf yang menurunkan efisiensi hingga 40% dan meningkatkan biaya perawatan. Penelitian ini membandingkan metode pencegahan dan penanganan *silica scaling* berdasarkan tinjauan 10 jurnal *open access* (2021–2025) dan studi kasus dari lapangan geothermal dunia. Modifikasi pH menggunakan H₂SO₄ terbukti menurunkan *Silica Saturation Index* (SSI) hingga <1 dengan efektivitas 80-90% di Olkaria dan Dieng, sedangkan *inhibitor phosphonic acid* cocok untuk *brine* dengan kandungan garam tinggi seperti Salton Sea. Teknologi *True Fluidics Oscillator* (TFO) meningkatkan laju alir hingga 90% tanpa merusak peralatan. Model prediktif probabilistik membantu strategi pencegahan dengan akurasi 85% di lapangan saline ekstrem seperti Assal. Sintesis silika mesopori di Onuma menghasilkan produk bernilai tinggi (luas permukaan >800 m²/g) sambil mencegah *scaling*. Hasil analisis menunjukkan pendekatan hybrid yang menggabungkan modifikasi pH, inhibitor, TFO, dan model prediktif memberikan solusi yang seimbang antara efektivitas dan biaya untuk berbagai kondisi lapangan, dengan total biaya kepemilikan 21.6% lebih rendah dibanding pendekatan reaktif dalam siklus 10 tahun. Penelitian ini merekomendasikan penerapan strategi spesifik berdasarkan karakteristik *brine* untuk keberlanjutan operasi geothermal.

Kata kunci: *Silica scaling*, modifikasi pH, inhibitor kimia, *True Fluidics Oscillator*, sintesis silika mesopori

1. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki potensi panas bumi mencapai 40% dari cadangan global, menjadikannya sumber energi strategis untuk transisi menuju pasokan energi berkelanjutan [1]. Namun, *silica scaling* tetap menjadi tantangan teknis yang menghambat efisiensi pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP). Presipitasi silika amorf (SiO₂) dari *brine geothermal* akibat perubahan suhu dan tekanan menyumbat pipa, *heat exchanger*, dan sumur produksi, menurunkan efisiensi operasional hingga 40% dan meningkatkan biaya pemeliharaan secara signifikan [2],[3].

Fenomena *scaling* terjadi ketika *Silica Saturation Index* (SSI) melebihi 1, menandakan kondisi supersaturasi yang memicu polimerisasi asam silikat menjadi silika koloid dan selanjutnya mengendap sebagai scale keras [2],[4]. Faktor pemicu utama meliputi konsentrasi silika tinggi (500–1000 mg/L), suhu reservoir ekstrem (250–350°C), dan laju pendinginan fluida yang cepat selama produksi. Di lapangan Dieng, Indonesia, *scaling* mengurangi laju alir produksi hingga 35% dalam 6 bulan operasi, menuntut pembersihan berkala yang meningkatkan biaya operasional [3].

Pemahaman terhadap mekanisme *scaling* sangat penting untuk merancang strategi mitigasi yang efektif. Di lapangan Hatchobaru, Jepang, pencampuran fluida asam (pH 2.8) dan basa lemah (pH 8.7) memicu presipitasi ganda besi dan silika, yang hanya dapat dikendalikan melalui pengaturan rasio campuran yang tepat [6],[7]. Kompleksitas kimia *brine* antar-lapangan

menuntut pendekatan spesifik yang mempertimbangkan karakteristik unik setiap reservoir, termasuk salinitas, temperatur, dan komposisi ion [8].

Metode pencegahan *silica scaling* berfokus pada pengendalian SSI melalui pendekatan kimiawi dan non-kimiawi. Modifikasi pH dengan penambahan asam seperti H_2SO_4 atau *sodium carbonate* terbukti meningkatkan kelarutan silika hingga 90% di lapangan Olkaria, Kenya, dengan menaikkan pH kondensat dari 2.5 ke 6.0 [9]. Inhibitor kimia seperti *phosphonic acid* mengganggu polimerisasi silika pada dosis rendah (<2 ppm), efektif untuk *brine* bersuhu tinggi di Salton Sea, AS [9]. Model prediktif berbasis probabilitas muncul sebagai inovasi untuk meminimalkan risiko scaling dengan mempertimbangkan ketidakpastian komposisi *brine*, terutama di lapangan saline ekstrem seperti Assal, Djibouti [10].

Penanganan *silica scaling* yang telah terbentuk mencakup metode mekanis dan teknologi canggih. *True Fluidics Oscillator* (TFO) memanfaatkan gelombang berdenyut untuk memecah *scale* keras tanpa merusak infrastruktur, terbukti meningkatkan laju alir produksi hingga 90% di berbagai lapangan [11]. Pelapisan pelindung seperti *polyphenylenesulphide* (PPS) melindungi *heat exchanger* dari *scaling* dan korosi, meskipun stabilitasnya menurun pada suhu $>130^\circ\text{C}$ dengan kehadiran H_2S [12]. *Acidizing* dengan H_2SO_4 efektif menghilangkan *scale* tebal, tetapi meningkatkan risiko korosi infrastruktur [3],[13].

Inovasi terkini mengubah *silica scaling* dari masalah menjadi peluang ekonomi. Sintesis silika mesopori dari air *geothermal* di Onuma, Jepang, menghasilkan produk bernilai tinggi dengan luas permukaan $>800\text{ m}^2/\text{g}$, sekaligus mengurangi konsentrasi silika *supersaturated* hingga $<280\text{ mg/L}$ [14]. Di Assal, Djibouti, pengendalian termodinamika melalui pendinginan konduktif memungkinkan ekstraksi logam berharga seperti litium, meningkatkan nilai ekonomi sumber daya *geothermal* [15].

Penelitian ini bertujuan membandingkan efektivitas, biaya operasional, dan keterbatasan berbagai metode pencegahan dan penanganan *silica scaling* dari 20 studi terkini (2021–2025) untuk memberikan rekomendasi strategi spesifik berdasarkan karakteristik lapangan (pH *brine*, salinitas, temperatur, SSI baseline) yang dapat digunakan operator PLTP dalam memilih metode paling efektif dan ekonomis.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan tinjauan pustaka sistematis terhadap 10 jurnal open access terbitan 2021–2025 yang membahas metode pencegahan dan penanganan *silica scaling* di lapangan *geothermal global*. Pemilihan jurnal dilakukan melalui database ilmiah seperti Google Scholar, ScienceDirect, dan MDPI dengan kata kunci "*silica scaling*", "*geothermal*", "*scale prevention*", "*scale treatment*", "*SSI prediction*", dan "*mesoporous silica synthesis*". Kriteria inklusi mencakup publikasi *peer-reviewed* yang menyajikan data empiris atau simulasi geokimia dari lapangan aktif, dengan fokus pada pendekatan kimiawi (modifikasi pH, *inhibitor*), non-kimiawi (*True Fluidics Oscillator*), dan inovasi terkini (sintesis silika mesopori, model prediktif) [2]–[11].

Cakupan geografis mencakup studi kasus dari lapangan *geothermal* di Indonesia (Dieng, Salak, Ulubelu, Kamojang), Jepang (Hatchobaru, Onuma), Kenya (Olkaria), Amerika Serikat (Salton Sea), dan Djibouti (Assal) untuk memastikan representativitas kondisi *brine* yang beragam, mulai dari fluida asam hingga *saline* ekstrem ($>70,000\text{ mg/L}$ klorida) [3],[7],[9],[15]. Setiap jurnal dievaluasi berdasarkan kualitas metodologi, validitas data geokimia, dan relevansi temuan untuk aplikasi operasional. Data dikumpulkan dalam bentuk parameter kunci seperti *Silica Saturation Index* (SSI), efektivitas penurunan scaling (%), biaya relatif metode, dan keterbatasan teknis.

Analisis dilakukan secara kualitatif dan kuantitatif dengan membandingkan efektivitas, biaya, dan aplikabilitas metode berdasarkan karakteristik lapangan. Efektivitas diukur melalui pengurangan SSI, pemulihan laju alir produksi (%), dan durasi pencegahan scaling. Biaya relatif dikategorikan berdasarkan investasi awal dan biaya operasional berkelanjutan yang dilaporkan dalam literatur [2],[3],[11]. Validasi geokimia dilakukan dengan memastikan keseimbangan ion dalam data fluida yang dilaporkan, mengurangi kesalahan prediksi SSI hingga <5% [16].

3. PEMBAHASAN

A. Tinjauan Hasil Temuan dari Studi Literatur

Berdasarkan tinjauan 10 jurnal terpilih, ditemukan berbagai pendekatan untuk mengatasi silica scaling dengan efektivitas dan biaya yang bervariasi tergantung karakteristik lapangan. Hasil temuan dari masing-masing penelitian disajikan dalam Tabel 1 berikut. Dari tabel tersebut terlihat bahwa setiap metode memiliki keunggulan spesifik tergantung kondisi lapangan. Modifikasi pH efektif untuk lapangan dengan *buffer capacity* rendah, inhibitor kimia cocok untuk brine saline tinggi, TFO unggul dalam penanganan *scale* tebal, sementara model prediktif dan sintesis silika mesopori menawarkan pendekatan inovatif yang mengubah scaling menjadi peluang ekonomi.

Tabel 1. Tinjauan Hasil Temuan Metode Pencegahan dan Penanganan *Silica Scaling* dari Studi Literatur (2021–2025)

Penulis dan Tahun	Hasil Temuan
F.B. Pamungkas dkk., 2025	Penambahan H ₂ SO ₄ menurunkan <i>Silica Saturation Index</i> (SSI) hingga <1 melalui penurunan pH, meningkatkan kelarutan silika; inhibitor antiscalant mengganggu kristalisasi silika secara kinetik, efektif pada dosis optimal di Dieng, Indonesia [3].
R. Longval dkk., 2024	Modifikasi pH dengan sodium carbonate di Olkaria, Kenya, meningkatkan pH kondensat dari 2.5 ke 6.0, mencegah presipitasi silika; phosphonic acid inhibitor efektif pada dosis rendah; teknologi electro-hydraulic pulse dan pencitraan akustik mendukung pembersihan non-invasif [9].
C. Penot dkk., 2023	Stainless steel 316L sebagai paduan tahan korosi melindungi heat exchanger, tetapi film pasif tidak stabil pada suhu >130°C dengan H ₂ S; pelapisan polyphenylenesulphide (PPS) dan polyphosphate efektif mencegah scaling dan korosi [12].
Y. Watanabe dkk., 2021	Sintesis silika mesopori dari air geothermal di Onuma, Jepang, menghasilkan produk dengan luas permukaan >800 m ² /g, mengurangi silika supersaturated (<280 mg/L) untuk mencegah scaling [14].
S. Juhri dkk., 2022	Pencampuran fluida asam (pH 2.8) dan basa lemah (pH 8.7) di Hatchobaru, Jepang, memicu presipitasi ganda besi dan silika; pengendalian rasio campuran mencegah scaling dengan menjaga pH optimal [6].
P. Shoeibi Omrani dkk., 2025	Model probabilistik memprediksi risiko scaling dengan mempertimbangkan ketidakpastian komposisi brine, menghasilkan strategi operasional robust untuk meminimalkan downtime di lapangan saline tinggi [10].
I. S. Bouraleh, 2024	Model pendinginan konduktif di Assal, Djibouti, lebih akurat memprediksi presipitasi silika amorf dan sulfida dibandingkan model boiling, mendukung pengendalian termodinamika; potensi ekstraksi logam berharga [15].
L. Kushonggo dkk., 2022	Teknologi True Fluidics Oscillator (TFO) menghilangkan scale keras (silika dan kalsit) melalui gelombang berdenyut, meningkatkan laju alir tanpa kerusakan mekanis di berbagai lapangan [11].
J. Lee and E. Chung, 2022	Ion silikat mengurangi efisiensi pemisahan litium di <i>Enhanced Geothermal Systems</i> (EGS) akibat co-precipitation; pra-perlakuan silikat meningkatkan pemulihan litium hingga 150 mg/L [17].

G. M. Idroes dkk., 2024	Validasi geokimia melalui keseimbangan ion mengurangi kesalahan prediksi SSI hingga <5%, esensial untuk akurasi strategi pencegahan silica scaling di lapangan geothermal [16].
-------------------------	---

B. Mekanisme Silica Scaling

Silica scaling terjadi melalui proses fisikokimia yang dimulai dari depolimerisasi silika dalam reservoir bersuhu tinggi (250–350°C) menjadi asam monosilikat (H_4SiO_4). Ketika fluida mengalami penurunan suhu dan tekanan saat produksi, terjadi polimerisasi kembali yang membentuk endapan silika [2],[4]. Konsentrasi silika dalam brine geothermal berkisar 500–1000 mg/L, jauh melebihi kelarutan silika amorf pada kondisi permukaan (100–150 mg/L pada 25°C), menciptakan kondisi supersaturasi kritis dengan SSI >1 [2],[18].

Di lapangan Dieng, penurunan suhu dari 235°C di reservoir ke 180°C di separator memicu presipitasi silika amorf yang mengurangi diameter pipa hingga 40% dalam 6 bulan operasi [3]. Kecepatan polimerisasi bergantung pada pH, temperatur, dan konsentrasi ion logam seperti Fe^{3+} dan Al^{3+} yang bertindak sebagai katalis nukleasi [6],[7]. Pencampuran fluida dengan pH berbeda menciptakan kompleksitas tambahan. Di Hatchobaru, *mixing* antara fluida asam (pH 2.8) dan basa lemah (pH 8.7) memicu presipitasi simultan besi hidroksida dan silika, membentuk *scale* komposit yang lebih keras [6].

Penelitian oleh Sofyan dkk menunjukkan bahwa zona *scaling* dapat diprediksi berdasarkan pola aliran fluida di sumur geothermal, di mana zona dengan perubahan tekanan dan temperatur drastis menjadi lokasi presipitasi paling intensif [7]. Analisis SSI, *scale formation rate*, dan *scale formation time* berbasis tekanan *wellhead* memungkinkan perencanaan strategi pencegahan yang lebih presisi [2]. Determinasi zona *scaling pada slotted liner* berdasarkan pola aliran fluida membantu merancang strategi *treatment* yang tepat sasaran [20].

C. Metode Pencegahan Silica Scaling

Modifikasi pH merupakan metode paling ekonomis untuk mencegah *silica scaling* dengan meningkatkan kelarutan silika melalui pergeseran kesetimbangan kimia. Penambahan H_2SO_4 di lapangan Olkaria menurunkan pH kondensat dari 2.5 ke 6.0, meningkatkan kelarutan silika hingga 90% dan menurunkan SSI dari 1.8 ke 0.7 [9]. Efektivitas tertinggi dicapai pada pH 5.5–6.5, di mana kelarutan silika maksimal dan risiko presipitasi ganda dengan ion logam minimal [6],[9].

Di Dieng, modifikasi pH dengan H_2SO_4 dosis 0.5–1.0 kg/ton *brine* menurunkan SSI hingga <1 selama 8 bulan operasi [3]. Biaya operasional metode ini berkisar USD 0.02–0.03/kWh untuk modifikasi pH dasar, namun dapat mencapai USD 0.02–0.04/kWh bila termasuk biaya monitoring pH sensor dan *flowmeter inline*, menjadikannya pilihan termurah untuk pencegahan *scaling* [3]. Namun, penggunaan asam meningkatkan risiko korosi pada pipa baja karbon hingga 2–3 mm/tahun, sehingga perlu upgrade material ke *stainless steel* 316L [12],[13].

Inhibitor kimia seperti *phosphonic acid* bekerja dengan mengganggu mekanisme kristalisasi silika pada tingkat molekuler. Pada dosis rendah (1–2 ppm), inhibitor efektif menurunkan laju presipitasi hingga 70–85% pada *brine* bersuhu tinggi (>250°C) di Salton Sea [9]. *Phosphonic acid* menunjukkan stabilitas termal hingga 280°C dan kompatibilitas dengan *brine saline* tinggi (>70,000 mg/L klorida) [9],[15]. Mekanisme inhibisi melibatkan adsorpsi molekul inhibitor pada permukaan inti kristal, menciptakan penghalang yang mencegah penambahan monomer silika [9]. Biaya operasional inhibitor berkisar USD 0.05–0.08/kWh, lebih tinggi dibanding modifikasi pH tetapi memberikan fleksibilitas pada kondisi *brine* kompleks [9].

Model prediktif berbasis probabilitas mengintegrasikan ketidakpastian komposisi *brine* dan variabilitas operasional untuk menghasilkan estimasi risiko *scaling* yang lebih akurat [10]. Di lapangan Assal, model Monte Carlo dengan 10,000 iterasi memprediksi probabilitas presi-

pitasi silika pada setiap titik sepanjang jalur produksi dengan akurasi 87% [10],[15]. Validasi model terhadap data scaling aktual menunjukkan akurasi lebih tinggi dibanding model deterministik konvensional, dengan kesalahan prediksi SSI <5% setelah validasi geokimia [15],[16]. Biaya operasional model prediktif setelah amortisasi investasi infrastruktur berkisar USD 0.01–0.02/kWh [10].

Sintesis silika mesopori mengubah paradigma manajemen scaling dari pembuangan limbah menjadi pemulihan sumber daya bernilai ekonomi [14]. Di Onuma, proses *batch* menggunakan *cetyltrimethylammonium bromide* (CTAB) sebagai templat menghasilkan silika mesopori dengan luas permukaan 820 m²/g, ideal untuk aplikasi sebagai adsorben atau katalis [14]. Proses mengurangi konsentrasi silika *brine* dari 450 mg/L ke 240 mg/L, menurunkan SSI dari 1.5 ke 0.8 [14]. Biaya bersih setelah dikurangi *revenue* penjualan produk silika mesopori berkisar USD 0.03–0.05/kWh [14].

D. Metode Penanganan Silica Scaling

True Fluidics Oscillator (TFO) merupakan teknologi non-kimiawi yang memanfaatkan gelombang tekanan berdenyut untuk memecah ikatan kristal *scale* keras tanpa merusak infrastruktur [11]. Di berbagai lapangan geothermal, TFO meningkatkan laju alir sumur 70–90% dan menurunkan tekanan tubing 30–50%, dengan efek bertahan 8–12 bulan [11]. Aplikasi TFO di lapangan Dieng pada sumur dengan *scaling* silika-kalsit tebal 5–8 mm meningkatkan produksi steam dari 45 ton/jam ke 78 ton/jam (peningkatan 73%) dalam 48 jam *treatment* [11].

Teknologi ini tidak memerlukan *shut-in* berkepanjangan, dengan *treatment* dilakukan pada kondisi *flowing well*, mengurangi *production loss* dibandingkan *acidizing* yang memerlukan *shut-in* 5–7 hari [3],[11]. Biaya per *treatment* berkisar USD 5,000–10,000, yang setara dengan USD 0.04–0.06/kWh bila dikonversi berdasarkan *cycle* 8–12 bulan dan kapasitas *plant* [11]. *Investment* untuk TFO unit (portable) berkisar USD 80,000–150,000, dengan biaya 40–60% lebih rendah dibanding *acidizing* [11].

Acidizing dengan H₂SO₄ atau HCl tetap menjadi metode standar untuk menghilangkan *scale* silika tebal (>5 mm) [3],[13]. Di Dieng, *acidizing* dengan H₂SO₄ 15% *volume* 50 m³ selama 24 jam menghilangkan *scale* tebal 12 mm dan meningkatkan produksi dari 30 ton/jam ke 72 ton/jam, bertahan 6–9 bulan sebelum re-treatment [3]. Penelitian terbaru oleh Sofyan dkk menunjukkan bahwa metode *broaching* dapat menjadi alternatif efektif untuk *scale treatment* pada *vapor-dominated well* di Kamojang, dengan tingkat keberhasilan tinggi dalam mengembalikan produktivitas sumur [13]. Biaya total *acidizing* termasuk *downtime cost* berkisar USD 0.08–0.12/kWh, menjadikannya metode termahal [3].

Pelapisan pelindung pada *heat exchanger* mencegah nukleasi silika dengan menciptakan permukaan *low-energy* yang mengurangi *adhesi scale* hingga 80–90% [12]. *Polyphenylenesulphide* (PPS) coating menunjukkan performa superior pada suhu 90–120°C, mengurangi *scale deposition rate* dari 2.5 mm/bulan menjadi 0.3 mm/bulan [12]. Namun, stabilitas film pasif menurun pada suhu >130°C dengan kehadiran H₂S >200 ppm, sehingga pemilihan material pelindung harus disesuaikan dengan kondisi operasional spesifik [12]. Biaya *lifecycle coating* dengan *amortization* 3–5 tahun berkisar USD 0.02–0.04/kWh [12].

E. Perbandingan Efektivitas dan Biaya

Perbandingan komprehensif menunjukkan bahwa tidak ada metode tunggal yang optimal untuk semua kondisi lapangan. Pemilihan metode bergantung pada karakteristik *brine*, infrastruktur yang ada, dan target operasional. Dari segi biaya, modifikasi pH menawarkan biaya operasional terendah (USD 0.02–0.04/kWh termasuk monitoring) untuk pencegahan, diikuti model prediktif setelah amortisasi *investment* (USD 0.01–0.02/kWh), pelapisan pelindung (USD 0.02–0.04/kWh), sintesis silika mesopori *net cost* (USD 0.03–0.05/kWh), TFO per *treat-*

ment (USD 0.04–0.06/kWh), inhibitor kimia (USD 0.05–0.08/kWh), dan *acidizing* sebagai yang tertinggi (USD 0.08–0.12/kWh termasuk *downtime cost*) [3],[9],[11],[12],[14].

Tabel 2. Perbandingan Metode Pencegahan dan Penanganan *Silica Scaling*

Metode	Efektivitas	Biaya (USD/kWh)	Durasi Efek	Keterbatasan	Lapangan Optimal
Modifikasi pH	80–90% penurunan SSI	0.02–0.04 ¹	8–12 bulan	Korosi, buffer capacity	Olkaria, Dieng
Inhibitor Kimia	70–85% penurunan presipitasi	0.05–0.08	12–18 bulan	Biaya tinggi, degradasi H ₂ S	Salton Sea, Assal
Model Prediktif	80–85% akurasi prediksi	0.01–0.02 ²	Kontinyu	Investment infrastruktur	Assal, Salton Sea
Sintesis Silika	70–80% penurunan SSI	0.03–0.05 ³	10–14 bulan	Skalabilitas proses	Onuma
TFO	75–90% peningkatan alir	0.04–0.06 ⁴	8–12 bulan	Aksesibilitas sumur	Dieng, Multi-field
Acidizing	90–95% removal scale	0.08–0.12	6–9 bulan	Korosi, downtime tinggi	<i>Emergency scale</i>
Pelapisan	80–90% penurunan adhesi	0.02–0.04 ⁵	3–5 tahun	Stabilitas suhu >130°C	<i>Heat exchanger</i>

Keterangan:

¹Termasuk biaya monitoring pH sensor dan *flowmeter inline*

²Biaya operasional kontinyu setelah amortisasi *investment* infrastruktur

³Biaya bersih setelah dikurangi revenue penjualan produk silika mesopori

⁴Biaya per treatment dikonversi ke basis kWh (*cycle* 8–12 bulan)

⁵Biaya *lifecycle* 3–5 tahun dengan *amortization*

Analisis total biaya kepemilikan dalam siklus 10 tahun menunjukkan perbedaan signifikan antar strategi. Tabel 3 menyajikan perbandingan untuk *plant* 50 MWe sebagai *baseline*. Berdasarkan Tabel 3, pendekatan *hybrid* memiliki total biaya kepemilikan USD 1,450,000 dalam 10 tahun, 21.6% lebih rendah dibanding pendekatan reaktif (USD 1,850,000), dengan *availability factor* 94–96% versus 85–88%. Peningkatan *availability* disebabkan pengurangan frekuensi *emergency shutdown* dari 8–10 kali/tahun pada pendekatan reaktif menjadi 2–3 kali/tahun melalui *predictive maintenance* dan *proactive treatment* [10]. Pendekatan yang mengintegrasikan pencegahan (modifikasi pH + inhibitor) dengan monitoring (model prediktif) dan penanganan proaktif (TFO) memberikan hasil optimal karena mengurangi *reliance* pada *single method* yang mungkin tidak efektif pada kondisi transient [10],[15].

Tabel 3. Perbandingan Total Biaya Kepemilikan 10 Tahun (Plant 50 MWe)

Strategi	Investment Awal (USD)	Biaya Tahunan ⁶ (USD)	Total 10 Tahun (USD)	Availability (%)
<i>Reactive (Acidizing only)</i>	50,000	180,000	1,850,000	85–88
Modifikasi pH	80,000	95,000	1,030,000	90–92
Inhibitor Kimia	100,000	145,000	1,550,000	91–93
TFO Periodic	150,000	80,000	950,000	89–91
Hybrid (pH + Inhibitor + TFO + Monitoring)	350,000	110,000	1,450,000	94–96

⁶Biaya tahunan mencakup operasional, *maintenance*, *procurement chemical*, dan *downtime cost*. Perhitungan berdasarkan *plant capacity factor* 85% dan harga listrik USD 0.08/kWh [3],[9],[11].

Integrasi *multiple methods* dalam pendekatan *hybrid* memungkinkan optimasi berdasarkan kondisi operasional *real-time*, mengurangi frekuensi *treatment emergency* yang mahal dan meningkatkan *predictability* operasional [10],[15]. Meskipun *investment* awal lebih tinggi (USD 350,000), penghematan biaya operasional tahunan (USD 110,000 vs USD 180,000 untuk *re-active*) menghasilkan *payback period* 3–4 tahun [10].

F. Rekomendasi Berdasarkan Karakteristik Lapangan

Implementasi strategi *anti-scaling* harus disesuaikan dengan karakteristik unik setiap lapangan. Untuk lapangan asam-moderate *temperature* seperti Dieng, strategi optimal menggunakan modifikasi pH dengan H_2SO_4 ke $\text{pH } 6.0 \pm 0.3$ sebagai metode primer, dilengkapi TFO *periodic* setiap 9–12 bulan sebagai sekunder, dengan monitoring melalui pH sensor dan *flow meter inline* [3],[11]. Biaya estimasi USD 0.02–0.04/kWh (termasuk monitoring pH sensor dan *flow-meter inline*) dengan *expected availability* 91–93%.

Untuk lapangan *saline-high temperature* seperti Salton Sea, pendekatan terbaik menggunakan inhibitor *phosphonic acid* 1.5–2.0 ppm *continuous* sebagai primer, dilengkapi model prediktif untuk optimasi dosing sebagai sekunder dan *acidizing emergency* setiap 18–24 bulan sebagai tersier [9],[10]. Biaya estimasi USD 0.06–0.08/kWh dengan *expected availability* 93–95%. Validasi geokimia melalui keseimbangan ion esensial untuk akurasi prediksi SSI [16].

Untuk lapangan extreme *saline* seperti Assal, strategi komprehensif menggabungkan *hybrid* pH adjustment dan inhibitor sebagai *primer*, *predictive model* dengan *Monte Carlo simulation* sebagai sekunder, TFO dan *selective acidizing* sebagai tersier, serta *resource recovery (Li, silica)* sebagai kuarternier [10],[15],[16]. Biaya estimasi USD 0.07–0.10/kWh net *cost* setelah *revenue* dengan *expected availability* 94–96%. Model pendinginan konduktif memberikan prediksi lebih akurat dibanding model *boiling* untuk sistem *saline* tinggi [15].

Untuk lapangan dengan potensi *resource recovery* seperti Onuma, strategi inovatif menggunakan *controlled precipitation* untuk *silica synthesis* sebagai *primer*, modifikasi pH *post-extraction* sebagai sekunder, dengan *product sales offset operational cost* [14]. Biaya estimasi USD 0.02–0.03/kWh net dengan *expected availability* 92–94%. Sintesis silika mesopori dengan CTAB sebagai templat menghasilkan produk komersial bernilai tinggi [14]. Berdasarkan pengalaman di lapangan Indonesia, Sofyan dkk menekankan pentingnya determinasi zona *scaling* dan tipe *scaling* pada *slotted liner* berdasarkan pola aliran fluida untuk merancang strategi *treatment* yang tepat [20]. Integrasi analisis *wellhead pressure* dengan simulasi *wellbore* memungkinkan prediksi *heat loss* dan optimasi parameter operasional untuk meminimalkan risiko *scaling* [19].

4. SIMPULAN

Perbandingan metode pencegahan dan penanganan *silica scaling* menunjukkan bahwa pendekatan *hybrid* yang mengintegrasikan modifikasi pH, inhibitor kimia, *True Fluidics Oscillator*, dan model prediktif memberikan solusi yang seimbang antara efektivitas dan biaya untuk berbagai kondisi lapangan *geothermal*. Analisis total biaya kepemilikan menunjukkan pendekatan *hybrid* memiliki biaya 21.6% lebih rendah dibanding pendekatan reaktif dalam siklus 10 tahun (USD 1,450,000 vs USD 1,850,000) dengan *availability factor* lebih tinggi (94–96% vs 85–88%). Modifikasi pH dengan H_2SO_4 atau *sodium carbonate* efektif menurunkan SSI hingga di bawah 1 dengan biaya operasional terendah (USD 0.02–0.04/kWh termasuk monitoring) untuk lapangan asam-moderate *temperature* seperti Dieng dan Olkaria, sedangkan inhibitor *phosphonic acid* memberikan fleksibilitas tertinggi untuk *brine saline* ekstrem di Salton Sea dan Assal (USD 0.05–0.08/kWh). Teknologi TFO menunjukkan keunggulan dalam penanganan non-kimiawi dengan efektivitas 70–90% peningkatan laju alir dan biaya per

treatment USD 0.04–0.06/kWh, mengurangi *downtime* signifikan dibanding *acidizing* (USD 0.08–0.12/kWh). Model prediktif probabilistik meningkatkan akurasi strategi hingga 85–95% dengan biaya operasional terendah setelah amortisasi (USD 0.01–0.02/kWh), mengurangi kesalahan prediksi SSI di bawah 5% melalui validasi geokimia. Sintesis silika mesopori mengubah *scaling* menjadi peluang ekonomi dengan produk bernilai tinggi (luas permukaan >800 m²/g) di Onuma, dan ekstraksi litium di Assal menambah nilai ekonomi operasi *geothermal*.

Penelitian ini memiliki keterbatasan pada validasi model biaya yang menggunakan data sekunder dari literatur tanpa verifikasi langsung di lapangan, di mana perbedaan karakteristik *brine* antar-lokasi dan fluktuasi harga *chemical* dapat mempengaruhi akurasi estimasi biaya. Penelitian lanjutan diperlukan untuk mengoptimalkan skalabilitas sintesis silika mesopori pada kapasitas komersial (>100 kg/hari), pengembangan inhibitor yang stabil pada suhu di atas 280°C dengan kehadiran H₂S tinggi (>500 ppm), integrasi *machine learning* untuk meningkatkan akurasi model prediktif di atas 95%, dan eksplorasi *resource recovery* terintegrasi yang menggabungkan pencegahan *scaling* dengan ekstraksi logam berharga serta produksi silika bernilai tinggi untuk meningkatkan keberlanjutan ekonomi dan lingkungan operasi *geothermal* Indonesia melalui implementasi pilot testing pada skala 1–5% kapasitas penuh sebelum penerapan penuh di berbagai lapangan dengan karakteristik *brine* yang berbeda.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Goldstein, G. Hiriart, R. Bertani, C. Bromley, L. Gutiérrez-Negrín, E. Huenges, H. Muraoka, A. Ragnarsson, J. Tester, and V. Zui, "Geothermal energy," in IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge University Press, 2011, pp. 401–436.
- [2] A. Sofyan, H. S. 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," Indonesian Journal of Energy and Mineral, vol. 1, no. 1, pp. 26–33, 2021.
- [3] F. B. Pamungkas, L. Rubianto, and M. E. Yavianda, "Analisis pengaruh jenis chemical terhadap potensi silica (SiO₂) scaling pada jalur pipa brine pembangkit listrik tenaga panas bumi menggunakan silica saturation index," DISTILAT Jurnal Teknologi Separasi, vol. 11, no. 3, pp. 445–453, 2025.
- [4] R. DiPippo, Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact, 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012.
- [6] S. Juhri, K. Yonezu, H. Inoue, Y. Kiyota, S. Ohshima, H. Uemura, N. Uchiyama, A. Ueda, and T. Yokoyama, "Precipitation behavior of iron and silicic acid when mixing acidic and weakly alkaline geothermal waters at the Hatchobaru geothermal power plant, Oita, Japan," Geothermics, vol. 104, p. 102470, 2022.
- [7] A. Sofyan, J. Szanyi, and H. S. Hari, "Investigation of Zone and Type of Scaling Based on the Fluid Flow Pattern in the Geothermal Well X at the Salak Geothermal Field-Indonesia," International Journal of Renewable Energy Research, vol. 14, no. 1, pp. 192–202, 2024.
- [8] A. Sofyan, "Scale formation and treatment plan in Indonesian geothermal wells," Ph.D. dissertation, University of Szeged, Szeged, Hungary, 2025.
- [9] R. Longval, R. Meirbekova, J. Fisher, and A. Maignot, "An overview of silica scaling reduction technologies in the geothermal market," Energies, vol. 17, no. 4, p. 4825, 2024.
- [10] P. Shoeibi Omrani, J. Poort, E. G. D. Barros, H. de Zwart, C. G. Machado, L. Wasch, A. Twerda, H. H. M. Rijnaarts, and S. S. Torbaghan, "A probabilistic model-based approach to assess and minimize scaling in geothermal plants," Geothermal Energy, vol. 13, no. 9, 2025.
- [11] L. Kushonggo et al., "Field application review of scale removal on geothermal wells and surface production facilities using True Fluidics Oscillator (TFO)-Pulsating Waves Method Technology," IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 1014, p. 012013, 2022.

- [12] C. Penot, D. Martelo, and S. Paul, "Corrosion and scaling in geothermal heat exchangers," *Applied Sciences*, vol. 13, p. 11549, 2023.
- [13] A. Sofyan, R. Jaya, H. Susanto, R. M. Njeru, G. Bozsó, and J. Szanyi, "Scale Treatment Planning Using Broaching Method in a Vapor-Dominated Geothermal Well X at Kamojang Geothermal Field," *Eng*, vol. 6, no. 4, p. 67, 2025.
- [14] Y. Watanabe, N. Amitani, T. Yokoyama, A. Ueda, M. Kusakabe, S. Unami, and Y. Odashima, "Synthesis of mesoporous silica from geothermal water," *Scientific Reports*, vol. 11, p. 23811, 2021.
- [15] I. S. Bouraleh, "Scaling potential during utilization of high temperature saline fluids in the Assal geothermal area (Djibouti)," M.S. thesis, Univ. of Iceland, Reykjavik, Iceland, 2024.
- [16] G. M. Idroes, S. Suhendrayatna, K. Khairan, E. Suhartono, R. Prasetyo, and M. Riza, "Ensuring accuracy: critical validation techniques in geochemical analysis for sustainable geothermal energy development," *Leuser Journal of Environmental Studies*, vol. 2, no. 1, 2024.
- [17] J. Lee and E. Chung, "The effect of silicate ions on the separation of lithium from geothermal fluid," *Frontiers in Chemical Engineering*, vol. 4, p. 741281, 2022.
- [18] M. A. Grant, I. G. Donaldson, and P. F. Bixley, *Geothermal Reservoir Engineering*. New York: Academic Press, 1982.
- [19] A. Sofyan, Y. D. G. Bujang, and B. Y. Suranta, "Heat loss effect analysis by using JIWAFlow wellbore simulation in geothermal field Well-Y," in *3rd Borobudur International Symposium on Science and Technology 2021*, AIP Publishing LLC, 2023, vol. 2706, no. 1, p. 020116.
- [20] A. Sofyan, S. Wiharti, J. Szanyi, B. Y. Suranta, and R. Njeru, "Determination of Scaling Zone and Scaling Type in Slotted Liner Based on the Fluid Flow Pattern in the Geothermal Well X," *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 13, no. 1, pp. 276–286, 2023.