

EVALUASI DAN STRATEGI OPTIMASI PENGENDALIAN *SCALING* SILIKA PADA SUMUR *GEOTHERMAL* LAPANGAN SF25

Estu Tatag Prawira Dharma¹, Akhmad Sofyan^{1,2*}, Diyah Rosiani¹

¹Teknik Produksi Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral AKAMIGAS, Jalan Gajah Mada No. 38 Cepu, Blora, 58315

²Department of Geology, Faculty of Earth Science, University of Szeged, 13 Dugonics Square, 6720 Szeged

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

ABSTRAK

Scaling silika merupakan permasalahan serius dalam operasi pembangkit listrik tenaga panas bumi yang dapat menurunkan produktivitas sumur secara signifikan. Penelitian ini menganalisis potensi *scaling* pada sumur produksi di lapangan *geothermal* SF25 yang memiliki kandungan silika sangat tinggi yaitu 921 ppm dengan wellhead pressure 23.85 barg. Metodologi penelitian menggunakan perhitungan manual *Saturation Index* mengikuti metode Fournier & Truesdell yang kemudian divalidasi menggunakan software PHREEQC. Hasil perhitungan manual menunjukkan *Silica Saturation Index* sebesar 1.49 pada temperatur separator 150°C, mengindikasikan kondisi supersaturasi moderat. Validasi menggunakan PHREEQC mengkonfirmasi hasil tersebut dengan *Saturation Index* (SI) Chalcedony 2.40, SI Quartz 2.51, dan Chrysotile SI 6.69. Analisis data produksi periode Juli-Agustus 2024 menunjukkan steam flow berkisar 48-50 ton/hari dengan penurunan produktivitas moderat sebesar 2% dalam dua bulan. Prediksi laju pembentukan deposit *scaling* berkisar 0.8-1.2 mm/tahun tanpa mitigasi yang dapat direduksi hingga 50-60% dengan treatment yang memadai. Strategi preventif yang direkomendasikan meliputi intermittent acid injection dengan dosis 10-20 ppm, aplikasi *scale inhibitor* 3-7 ppm, *mechanical cleaning* setiap 12-18 bulan, serta monitoring geokimia berkala. Evaluasi ekonomi menunjukkan *benefit/cost ratio* berkisar 1.8-2.5 dengan *payback period* sangat menarik yaitu 2-4 bulan.

Kata kunci: *Geothermal, Saturation Index, Silica Scaling, Wellhead Pressure*

1. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki potensi energi panas bumi mencapai 28,910 MW atau 40% dari cadangan *global*, namun pemanfaatan masih terbatas sekitar 8% [1]. Lapangan *geothermal* SF25 di Jawa Tengah merupakan area prospektif dengan temperatur *reservoir* >250°C. *Scaling* mineral, khususnya silika, merupakan permasalahan operasional utama yang dapat menurunkan produktivitas sumur secara signifikan akibat perubahan kondisi fisika-kimia fluida terutama tekanan, temperatur, dan pH ketika fluida mengalir dari *reservoir* menuju permukaan [2],[3]. Pada temperatur *reservoir* tinggi, silika dapat larut hingga 800-1000 ppm, namun solubilitas menurun drastis menjadi 100-150 ppm pada temperatur permukaan 100°C [4].

Penelitian terdahulu mengkaji analisis *Scale Saturation Index* dan laju pembentukan berdasarkan *wellhead pressure* [5], menginvestigasi zona dan tipe *scaling* berdasarkan pola aliran fluida [6], menentukan zona *scaling* pada *slotted liner* [7], merencanakan *scale treatment* menggunakan metode *broaching* pada sumur *vapor-dominated* [8], serta mengembangkan *framework* komprehensif mengenai *scale formation* dan *treatment plan* [9]. Kajian mengenai parameter hidrokimia dan kinetika *carbonate scale* [10], *geothermometer* empiris Na-K-Ca [11], software PHREEQC untuk perhitungan geokimia [12], serta *amorphous silica scaling* [13] memberikan dasar teoritis kuat untuk penelitian ini.

Sumur produksi yang dikaji memiliki karakteristik unik dengan konsentrasi silika 921 ppm dan *wellhead pressure* tertinggi 23.85 barg di lapangan. Penelitian ini bertujuan

mengkarakterisasi fluida geokimia sumur, menghitung *Saturation Index* menggunakan metode manual dan validasi PHREEQC, menganalisis dampak terhadap produktivitas, memprediksi laju pembentukan *scaling* dengan identifikasi zona kritis, serta merumuskan strategi mitigasi berbasis analisis ekonomi.

2. METODE PENELITIAN

A. Lokasi dan Karakteristik Sumur

Penelitian dilakukan pada sumur produksi *directional* (kedalaman 2.100 m) di lapangan *geothermal* SF25, Jawa Tengah. Sumur beroperasi pada *wellhead pressure* 23.85 barg dengan temperatur 186-190°C. Data yang digunakan meliputi geokimia fluida (*sampling* Juni 2024) dan produksi harian (Juli-Agustus 2024).

B. Prosedur *Sampling* dan Analisis Geokimia

Sampling fase *brine* dilakukan pada *separator* saat kondisi operasi stabil. Sampel diambil menggunakan *container stainless steel* steril dan dipisahkan ke dalam tiga botol untuk analisis berbeda: (1) parameter in-situ (pH, *electrical conductivity*, temperatur); (2) anion tanpa perlakuan; (3) kation yang diasamkan dengan HNO₃ hingga pH < 2 untuk mencegah presipitasi mineral. Analisis laboratorium menggunakan metode standar: kation (Na, K, Ca, Mg, Fe, Li) dengan ICP-OES; anion (Cl, SO₄) dengan *Ion Chromatography*; HCO₃ dengan titrasi; dan silika dengan spektrofotometri kolorimetri metode *molybdate blue*.

C. Perhitungan Manual *Saturation Index*

Perhitungan *Saturation Index* dilakukan untuk *calcite* dan silika menggunakan metode yang telah dikembangkan sebelumnya [5,11]. Untuk *Calcite Saturation Index*, konsentrasi ion Ca²⁺ dan CO₃²⁻ dikonversi ke satuan mol/L, kemudian *Ion Activity Product* (IAP) dihitung sebagai:

$$IAP = [Ca^{2+}] \times [CO_3^{2-}] \quad (1)$$

Calcite Saturation Index (CSI) kemudian dihitung dengan rumus:

$$CSI = \log \left(\frac{IAP}{K_{Sp}} \right) \quad (2)$$

Dimana *K_{sp calcite}* pada 25°C adalah 3.36 × 10⁻⁹ mol²/L². Nilai CSI > 0 mengindikasikan supersaturasi dan potensi presipitasi *calcite* [10]. Untuk *Silica Saturation Index*, temperatur kesetimbangan untuk *amorphous silica* dihitung menggunakan persamaan *geothermometer* Fournier-Truesdell [11]:

$$T(^{\circ}C) = \frac{1309}{5.19 - \log(SiO_2)} - 273.15 \quad (3)$$

Silica Saturation Index kemudian dihitung dengan rumus:

$$SSI = \frac{[SiO_2]_{actual}}{[SiO_2]_{equilibrium}} \quad (4)$$

D. Validasi Menggunakan PHREEQC

Validasi perhitungan manual menggunakan PHREEQC versi 3 [12]. *Input data* meliputi komposisi kimia laboratorium, temperatur 178°C, tekanan 9 atm (23.85 barg), dan pH 6.53. PHREEQC menghitung *Saturation Index* berbagai mineral dengan memperhitungkan koreksi *ionic strength* dan *activity coefficient* yang lebih komprehensif.

E. Analisis Data Produksi

Data produksi harian Juli-Agustus 2024 dianalisis menggunakan statistik deskriptif untuk mengevaluasi performa sumur dan mengidentifikasi indikasi pembentukan *scaling*. Analisis *trend* dilakukan untuk mendeteksi penurunan produktivitas yang mengindikasikan pembentukan *scaling* [14].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menguraikan hasil karakterisasi geokimia fluida *reservoir* dan analisis termodinamika untuk mengkuantifikasi potensi *scaling* silika dan kalsit pada sumur produksi SF25. Data komposisi kimia fluida dari *separator* menjadi dasar untuk perhitungan *manual Saturation Index* (SI) menggunakan metode Fournier & Truesdell untuk silika dan perhitungan IAP (*Ion Activity Product*) untuk kalsit, yang selanjutnya divalidasi dengan simulasi termodinamika menggunakan perangkat lunak PHREEQC untuk memperhitungkan pengaruh *ionic strength* dan *activity coefficient*. Hasil numerik tersebut kemudian dikorelasikan dengan data kinerja produksi (laju alir *steam*, tekanan, dan temperatur *wellhead*) periode Juli-Agustus 2024 untuk mengevaluasi dampak *scaling* secara operasional. Berdasarkan tingkat kejenuhan (*saturation state*) yang teridentifikasi, dilakukan prediksi kinetik laju deposisi *scaling* dan pemetaan zona kritis dalam sistem produksi. Sintesis dari seluruh analisis tersebut menjadi dasar untuk merumuskan strategi mitigasi berbasis kimia dan mekanis, yang kelayakannya diuji melalui evaluasi ekonomi untuk memastikan efektivitas biaya (*cost-effectiveness*).

A. Karakteristik Geokimia Fluida Sumur

Hasil analisis geokimia fluida *brine* menunjukkan karakteristik khas fluida *geothermal* bertemperatur tinggi (Tabel 1).

Tabel 1. Komposisi Geokimia Fluida *Brine* dari *Separator*

Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
WHP (barg)	23.85	TDS (ppm)	34,162
WHT (°C)	186-190	Si (ppm)	921
pH	6.53	Li (ppm)	51.73
EC (μS/cm)	49,500	Mg (ppm)	0.28
Cl (ppm)	18,995	Fe (ppm)	0.10
HCO ₃ (ppm)	42.00	Na/K	3.45
Na (ppm)	9,768	Cl/HCO ₃	452
K (ppm)	2,833	T <i>reservoir</i> (°C)	260-270
Ca (ppm)	219	I (mol/kg)	0.9

Fluida produksi didominasi oleh ion klorida dengan konsentrasi sangat tinggi mencapai 18,995 ppm dan ion natrium 9,768 ppm. Dominasi kedua ion ini mencerminkan karakteristik khas fluida *chloride water* yang sangat *mature*, yaitu fluida yang telah mengalami *water-rock interaction* intensif dalam waktu geologis yang sangat panjang di dalam *reservoir* [9]. *Total dissolved solids* (TDS) mencapai nilai sangat tinggi yaitu 34,162 ppm dengan *electrical conductivity* 49,500 μS/cm yang konsisten dengan kandungan ion terlarut yang sangat besar. Fluida produksi didominasi ion klorida (18.995 ppm) dan natrium (9.768 ppm), mencerminkan karakteristik *chloride water mature* hasil *water-rock interaction* intensif. TDS mencapai 34.162

ppm dengan *electrical conductivity* 49.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Kandungan silika sangat tinggi (921 ppm), jauh melebihi solubilitas *amorphous silica* pada temperatur permukaan ($\sim 100\text{--}150$ ppm pada 100°C) [4], mengindikasikan supersaturasi silika signifikan saat temperatur turun. Pada kondisi pH 6.53 (netral-sedikit asam) mempengaruhi spesiasi silika. Pada pH < 9 , silika didominasi bentuk *monomeric* (H_4SiO_4) dengan reaktivitas polimerisasi tinggi [13]. Rasio Na/K (3.45) mengestimasi temperatur *reservoir equilibrium* $260\text{--}270^\circ\text{C}$ menggunakan *geothermometer* Na-K [11]. Rasio Cl/HCO_3 sangat tinggi (452) mengkonfirmasi fluida dari *reservoir* dalam dengan pengaruh air meteorik minimal [7]. Konsentrasi kalsium (219 ppm) berpotensi membentuk *calcite scaling* saat pH meningkat atau *degassing* CO_2 . Magnesium sangat rendah (0.28 ppm) mengindikasikan temperatur *reservoir* sangat tinggi karena presipitasi *Mg-silicate* [9]. *Ionic strength* sangat tinggi (0.9 mol/kg) mempengaruhi *activity coefficient* dan harus diperhitungkan dalam kalkulasi *Saturation Index* [10].

B. Perhitungan Manual Saturation Index

Perhitungan *Calcite* SI dimulai dengan konversi konsentrasi $\text{Ca}^{2+} = 0.005464$ mol/L dan $\text{HCO}_3^- = 0.000689$ mol/L. Pada pH 6.53, fraksi karbonat $\alpha_2 = 1.51 \times 10^{-4}$. Dengan koreksi temperatur *separator*, konsentrasi CO_3^{2-} efektif diestimasi 0.000677 mol/L. *Ion Activity Product* $= 3.699 \times 10^{-6}$ mol²/L². *Calcite* SI = 3.04 mengindikasikan supersaturasi sangat tinggi, menunjukkan potensi tinggi untuk mengendapkan *calcite* terutama saat *degassing* CO_2 atau penurunan tekanan [10]. Untuk *Silica* SI, $\log[\text{SiO}_2] = 2.964$. Temperatur kesetimbangan *amorphous silica* = 196.7°C , sedikit lebih tinggi dari *wellhead temperature* ($186\text{--}190^\circ\text{C}$), mengindikasikan fluida sudah mulai mengalami supersaturasi di daerah *wellhead*. Pada temperatur *separator* 150°C , solubilitas silika = 620 ppm. *Silica* SI = $921/620 = 1.49$ mengindikasikan supersaturasi moderat yang akan meningkat saat temperatur turun di *downstream equipment* [5]. Tabel 2 merangkum hasil perhitungan *manual Saturation Index* untuk kedua mineral.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Manual Saturation Index

Parameter	Nilai	Interpretasi
<i>Calcite Saturation Index</i>		
Konsentrasi Ca^{2+} (mol/L)	0.005464	-
Konsentrasi CO_3^{2-} (mol/L)	0.000677	-
<i>Ion Activity Product</i> (mol ² /L ²)	3.699×10^{-6}	-
CSI	3.04	Supersaturasi sangat tinggi
<i>Silica Saturation Index</i>		
Konsentrasi SiO_2 (ppm)	921	-
Temperatur <i>equilibrium</i> ($^\circ\text{C}$)	196.7	-
Solubilitas @ 150°C (ppm)	620	-
SSI	1.49	Supersaturasi moderat

C. Validasi dengan PHREEQC

Validasi menggunakan PHREEQC menggunakan metode Debye – Huckel dilakukan untuk mengkonfirmasi hasil perhitungan manual dengan perhitungan yang memperhitungkan koreksi *ionic strength*, *activity coefficient*, dan kompleksasi ion lebih komprehensif [12]. Hasil simulasi pada kondisi *separator* (178°C , 9 atm) ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Saturation Index Mineral Hasil Simulasi PHREEQC

Mineral	SI	Status	Interpretasi
Silica Polymorphs			
<i>Chalcedony</i>	2.40	Supersaturasi tinggi	Presipitasi sangat <i>probable</i>
<i>Quartz</i>	2.51	Supersaturasi tinggi	Presipitasi lambat tapi pasti
<i>SiO₂(a)</i>	1.91	Supersaturasi moderat	Presipitasi paling cepat
Magnesium Silicates			
<i>Chrysotile</i>	6.69	Supersaturasi ekstrem	Terbatas oleh kinetika
<i>Sepiolite</i>	4.35	Supersaturasi tinggi	Terbatas oleh kinetika
<i>Talc</i>	16.34	Supersaturasi ekstrem	Kinetika sangat lambat
Iron Oxides			
<i>Hematite</i>	16.29	Supersaturasi ekstrem	<i>Trace amounts</i>
<i>Goethite</i>	6.90	Supersaturasi tinggi	<i>Trace amounts</i>

Hasil dari PHREEQC menunjukkan SI *Chalcedony* 2.40, lebih tinggi dari SSI *manual* 1.49 karena memperhitungkan koreksi *ionic strength*. Dengan TDS 34.162 ppm (*ionic strength* ~0.9 mol/kg), *activity coefficient* untuk *silica* 0.585 yang signifikan menurunkan aktivitas efektif silika dan meningkatkan nilai *Saturation Index*. SI *Quartz* (2.51) sedikit lebih tinggi dari SI *Chalcedony* (2.40), konsisten dengan urutan stabilitas termodinamika. Namun dalam praktek, *chalcedony* dan *amorphous silica* (SI 1.91) cenderung terbentuk lebih dulu karena *activation energy* lebih rendah [13].

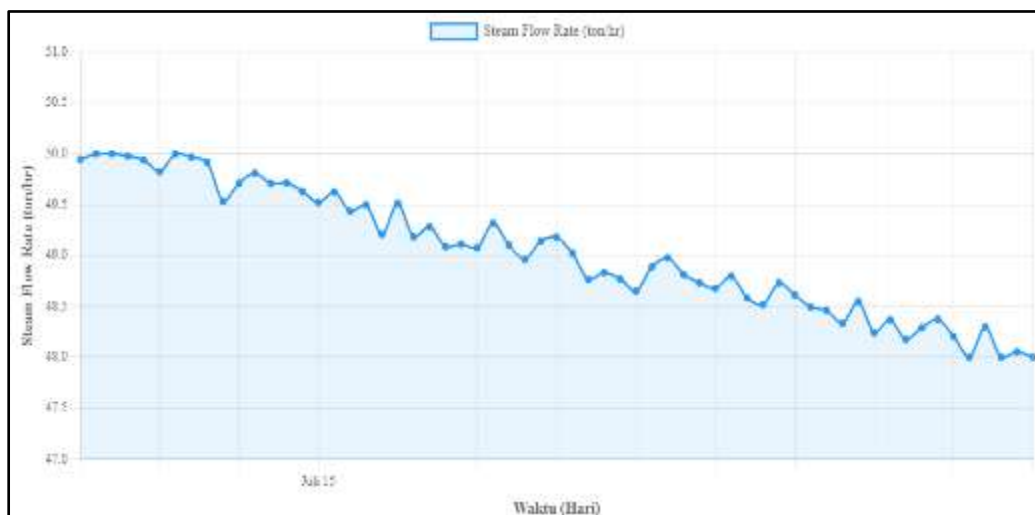
Chrysotile (SI 6.69) menunjukkan potensi pembentukan *Mg-silicate scaling* sangat tinggi secara termodinamika [9], namun pembentukan sangat terbatas oleh kinetika dikarenakan konsentrasi senyawa Mg rendah (0.28 ppm). Meskipun kontribusinya terhadap total *scaling mass minor*, *chrysotile* dapat berfungsi sebagai *nucleation sites* untuk presipitasi silika. Perbandingan hasil manual dengan PHREEQC menunjukkan konsistensi baik, dimana keduanya mengindikasikan supersaturasi moderat hingga tinggi dan *scaling* silika merupakan *concern* utama yang memerlukan program mitigasi efektif [6].

D. Analisis Data Produksi dan Dampak *Scaling*

Data produksi sumur untuk periode Juli-Agustus 2024 dianalisis untuk mengevaluasi performa sumur dan mengidentifikasi indikasi pembentukan *scaling*. Tabel 4 menampilkan statistik deskriptif untuk parameter produksi utama.

Tabel 4. Statistik Data Produksi Sumur Juli-Agustus 2024

Parameter	Mean (μ)	Standard Deviation (σ)	CV (%)	Min.	Max.
<i>Steam Flow</i> (ton/hari)	49.0	0.52	1.06	48.0	50.0
<i>Well Head Pressure</i> (barg)	23.37	0.30	1.28	23.07	23.84
<i>Well Head Temperature</i> (°C)	186.30	0.54	0.29	185.33	187.21



Gambar 1. Trend Steam Flow Rate Periode Juli-Agustus 2024

Gambar 1 menunjukkan steam flow rate menunjukkan rata-rata 49.0 ton/hari dengan CV hanya 1.06%, mengindikasikan operasi stabil. Namun analisis *trend* menunjukkan penurunan produktivitas dari 50 ton/hari (awal Juli) menjadi 48 ton/hari (akhir Agustus), yaitu penurunan senilai 2% dalam dua bulan. Penurunan ini termasuk kategori moderat dan masih dalam batas *acceptable*, namun mengindikasikan *scaling* sedang terbentuk *gradual* meskipun sudah dilakukan *intermittent acidification treatment* [14].

Wellhead pressure menunjukkan rata-rata 23.37 barg dengan CV 1.28%, relatif stabil tanpa indikasi penurunan signifikan yang dapat mengindikasikan *flow restriction severe* [8]. *Wellhead temperature* sangat stabil (rata-rata 186.30°C, CV 0.29%), mengindikasikan kondisi *reservoir* stabil. Sumur beroperasi dengan program *intermittent acidification treatment* (*acid injection pump running stroke* 8-15% selama periode *high production* atau saat pH meningkat) dengan dosis *acid* sebesar 10-20 ppm, yang mana disesuaikan dengan *monitoring* geokimia mingguan. Efektivitas *treatment* dapat dievaluasi dari penurunan produktivitas relatif moderat (2% dalam 2 bulan). Tanpa *treatment*, dengan SSI 1.49 dan CSI 3.04, penurunan produktivitas diperkirakan dapat mencapai 5-8% dalam periode yang sama [5], mengindikasikan *treatment* efektif mengurangi laju *scaling* sekitar 50-60% namun tidak sepenuhnya mencegah *scaling*.

E. Prediksi Laju Presipitasi dan Identifikasi Zona Kritis

Berdasarkan hasil perhitungan *Saturation Index* baik manual maupun PHREEQC, prediksi laju pembentukan *scaling* dapat diestimasikan untuk merencanakan program *maintenance* dan mitigasi yang optimal. Berdasarkan hasil perhitungan SI, prediksi laju pembentukan *scaling* dapat diestimasikan. Dengan SSI manual 1.49, laju deposit silika pada kondisi *separator* diestimasi 0.6-0.9 mm/tahun pada zona kritis [5]. Dengan mempertimbangkan SI *Chalcedony* 2.40 dari PHREEQC, *actual deposition rate* kemungkinan lebih tinggi yaitu 0.8-1.2 mm/tahun tanpa mitigasi memadai. Laju deposit bervariasi tergantung lokasi. Pada *separator* dengan penurunan temperatur dan *pressure* yang signifikan, laju deposit diperkirakan paling tinggi ~1.0-1.2 mm/tahun karena SSI meningkat menjadi 1.5-2.0 [6].

Pada *heat exchanger downstream* dengan temperatur turun lebih lanjut, SSI dapat meningkat menjadi 2.0-2.5. Pada *pipeline downstream separator*, *cooling* progresif menyebabkan SSI terus meningkat. Pada *section* dengan temperatur turun hingga 120-130°C, SSI dapat mencapai 2.5-3.0 dengan laju deposit estimasi 1.2-1.5 mm/tahun [7]. Dengan *treatment intermittent acidification* saat ini (dosis 10-20 ppm), *actual deposition rate* dapat

direduksi sekitar 50-60% menjadi 0.4-0.6 mm/tahun. Pada *separator* yang langsung kontak dengan *injected acid*, efektivitas *treatment* lebih tinggi mencapai 60-70%. Sedangkan pada *downstream equipment* yang lebih jauh dari *injection point*, efektivitas berkurang menjadi hanya 40-50%. Untuk *Mg-silicate*, meskipun *Chrysotile* SI sangat tinggi (6.69), laju deposit aktual diperkirakan hanya ~0.05-0.1 mm/tahun karena sangat terbatas oleh konsentrasi Mg rendah (0.28 ppm) [9]. *Calcite* dengan CSI 3.04 berpotensi terpresipitasi dengan laju signifikan terutama pada zona *degassing CO₂* dan peningkatan pH [10], dengan laju deposit bernilai 0.2-0.4 mm/tahun (terutama pada zona *flash*). Total *accumulation rate* untuk semua jenis *scaling* diestimasikan sekitar 1.0-1.5 mm/tahun tanpa mitigasi, atau 0.5-0.8 mm/tahun dengan program *current treatment*. Dalam periode 12 bulan, akumulasi *scaling* dapat mencapai 0.5-0.8 mm yang mulai dapat mengurangi diameter efektif pipa dan meningkatkan *pressure drop* [6]. Zona-zona kritis yang memerlukan perhatian khusus meliputi: (1) *Separator* - zona dengan laju *scaling* tertinggi, perlu inspeksi setiap 4-6 bulan; (2) *Heat Exchanger - tube-tube* sangat rentan terhadap *fouling*, memerlukan *cleaning* setiap 6-9 bulan; (3) *Pipeline Downstream* - terutama pada *section* dengan *cooling rate* tinggi, memerlukan *monitoring* dengan *pressure drop measurement*; (4) *Slotted Liner* dan *Wellbore* - pada zona lebih dalam dengan temperatur lebih rendah dapat terjadi *scaling* terutama pada zona dengan *reduced flow velocity* [7].

F. Strategi Mitigasi dan Evaluasi Ekonomi

Strategi mitigasi komprehensif direkomendasikan meliputi: (1) *Chemical Treatment* - kombinasi *acid treatment* (*intermittent* 10-20 ppm atau *continuous* 5-10 ppm) menggunakan HCl untuk mencegah *calcite scaling* dan mengontrol pH [2], serta *scale inhibitor* berbasis *polyelectrolyte* (3-7 ppm) untuk menghambat *nucleation* dan *crystal growth* silika [9,13]; (2) *Mechanical Intervention - broaching cleaning* setiap 12-18 bulan (biaya 50.000-100.000 USD/event), *separator inspection* setiap 4-6 bulan (5.000-10.000 USD/event), dan *heat exchanger cleaning* setiap 6-9 bulan (10.000-20.000 USD/event) [8]; (3) Program *Monitoring - daily production monitoring, bi-weekly geochemistry sampling, monthly comprehensive analysis*, dan *quarterly pressure survey* untuk *early detection* dan optimasi *treatment* [14,15].

Tabel 5. Evaluasi Ekonomi Program Mitigasi *Scaling*

Komponen	Biaya Tahunan (USD)	Benefit Tahunan (USD)
COST COMPONENTS		
<i>Scale inhibitor</i> (4,320 kg/yr @ \$5-10/kg)	21,600 - 43,200	-
<i>Acid injection</i> (6,480 kg/yr @ \$2-3/kg)	12,960 - 19,440	-
<i>Wellbore cleaning</i> (1x/18 month)	33,000 - 67,000	-
<i>Separator & HX cleaning</i>	20,000 - 40,000	-
<i>Monitoring & labor</i>	10,000 - 20,000	-
TOTAL COST	97,560 - 189,640	-
BENEFIT COMPONENTS		
<i>Prevent 5% production loss</i> (vs no treatment)	-	150,000 - 200,000
<i>Extended equipment lifetime</i>	-	40,000 - 60,000
<i>Reduced emergency intervention</i>	-	30,000 - 50,000
<i>Optimized well performance</i>	-	20,000 - 30,000
TOTAL BENEFIT	-	240,000 - 340,000
NET BENEFIT	50,360 - 242,440	-
Benefit/Cost Ratio	2.5 - 1.8	-
Payback Period (months)	2-4	-

Evaluasi ekonomi menunjukkan *total cost* program mitigasi 97.560-189.640 USD/tahun meliputi *chemical cost* (34.560-62.640 USD), *mechanical cleaning* (53.000-107.000 USD), dan *monitoring* (10.000-20.000 USD). *Total benefit* diestimasikan 240.000-340.000 USD/tahun

meliputi *preventing production loss* (150.000-200.000 USD), *extended equipment lifetime* (40.000-60.000 USD), *reduced emergency intervention* (30.000-50.000 USD), dan *optimized well performance* (20.000-30.000 USD) [1,16]. Didapatkan *net benefit* 50.360-242.440 USD/tahun, *benefit/cost ratio* 1.8-2.5, dan *payback period* sangat menarik hanya 2-4 bulan (Tabel 5).

Benefit dari program mitigasi meliputi beberapa komponen. *Preventing production loss* merupakan *benefit* terbesar. Tanpa *treatment adequate*, penurunan produktivitas diperkirakan dapat mencapai 5-8% per tahun berdasarkan SSI dan CSI yang tinggi. Dengan *steam production* 49 ton/hari dan *electricity production* sekitar 8-10 MWe, serta *electricity* tarif \$0.08-0.10/kWh, *production loss* 5% ekuivalen dengan *revenue loss* sekitar 150,000-200,000 USD/year. *Extended equipment lifetime* merupakan *benefit* signifikan karena *scaling* yang *severe* dapat menyebabkan *premature failure* pada *separator*, *heat exchanger*, dan *pipeline* yang memerlukan *replacement* dengan *cost* sangat tinggi. Dengan *proper scaling control*, *equipment lifetime* dapat diperpanjang 3-5 tahun yang ekuivalen dengan *benefit* 40,000-60,000 USD/year dalam *annualized term* [26]. *Reduced emergency intervention cost* juga signifikan karena *unplanned shutdown* untuk *scaling removal* sangat *costly*, tidak hanya dari sisi *direct cost* untuk *intervention* tetapi juga *opportunity cost* dari *lost production*. Dengan *preventive program*, *frequency emergency intervention* dapat dikurangi dari 2-3 *times/year* menjadi *less than 1 time/year*, *saving* sekitar 30,000-50,000 USD/year. *Total benefit* diestimasi 240,000-340,000 USD/year *versus total cost* 97,560-189,640 USD/year, menghasilkan *net benefit* 50,360-242,440 USD/year. *Benefit/Cost ratio* berkisar 1.8-2.5 yang sangat *attractive* untuk *operational improvement program*.

Payback period hanya 2-4 bulan yang sangat *short*, mengindikasikan bahwa *investment* dalam program mitigasi akan *recovered* sangat cepat [1]. *Sensitivity analysis* menunjukkan bahwa bahkan pada *worst case scenario* dimana *cost* di *upper end* dan *benefit* di *lower end*, B/C *ratio* masih 1.8 yang *acceptable*. Pada *best case scenario* dengan *cost* di *lower end* dan *benefit* di *upper end*, B/C *ratio* mencapai 3.5 yang sangat *attractive*. Perlu digarisbawahi bahwa evaluasi ini belum memperhitungkan *intangible benefits* seperti *improved operational reliability*, *reduced environmental risk*, dan *enhanced HSE performance* yang juga *significant* meskipun sukar dikuantifikasi dalam *monetary term* [2].

4. SIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengkarakterisasi potensi *scaling* pada sumur produksi lapangan *geothermal* SF25 secara komprehensif. Fluida *brine* memiliki karakteristik ekstrem dengan kandungan silika sangat tinggi (921 ppm), TDS 34.162 ppm, pH 6.53, *wellhead pressure* 23.85 barg, dan *ionic strength* sangat tinggi (0.9 mol/kg). Perhitungan manual menghasilkan *Calcite* SI 3.04 (supersaturasi sangat tinggi) dan *Silica* SI 1.49 (supersaturasi moderat), yang dikonfirmasi oleh validasi PHREEQC dengan SI *Chalcedony* 2.40, SI *Quartz* 2.51, dan *Chrysotile* SI 6.69. Data produksi menunjukkan *steam flow* 48-50 ton/hari dengan penurunan moderat 2% dalam dua bulan, mengkonfirmasi *scaling* sedang terbentuk namun terkontrol dengan *intermittent acidification treatment*. Prediksi laju deposit *scaling* 0.8-1.2 mm/tahun tanpa mitigasi dapat direduksi 50-60% menjadi 0.4-0.6 mm/tahun dengan *treatment* saat ini, dengan zona kritis teridentifikasi pada *separator*, *heat exchanger*, dan *pipeline downstream*. Strategi mitigasi terintegrasi direkomendasikan meliputi *chemical treatment* (*acid injection* 10-20 ppm dan *scale inhibitor* 3-7 ppm), *mechanical cleaning* berkala (*broaching* setiap 12-18 bulan, *separator inspection* setiap 4-6 bulan, *heat exchanger cleaning* setiap 6-9 bulan), dan *monitoring* geokimia komprehensif.

Evaluasi ekonomi menunjukkan program mitigasi sangat *feasible* dengan *total cost* 97.560-189.640 USD/tahun *versus total benefit* 240.000-340.000 USD/tahun, menghasilkan *net benefit* 50.360-242.440 USD/tahun, *benefit/cost ratio* 1.8-2.5, dan *payback period* sangat menarik 2-4 bulan, menjustifikasi implementasi program untuk *sustainability* operasional jangka panjang. Untuk implementasi, disarankan optimasi *chemical treatment* dengan *trial continuous acid injection*, peningkatan *monitoring* dengan sistem *online* untuk parameter kritis (pH, *conductivity*, silica), *periodic inspection* menggunakan *downhole camera* atau *caliper logging* setiap 12 bulan, serta studi lanjutan mengenai kinetika presipitasi silika pada kondisi spesifik sumur dan pengembangan *predictive* model berbasis *machine learning* untuk *continuous improvement* program mitigasi.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Sofyan, H. S. Aka, A. M. Rizaldy, and B. Y. Suranta, "Development of Indonesian Wellhead Generating Unit (Small Scale) Based on Legal and Regulation of PT. Geo Dipa Dieng: A Case Study," *2nd Borobudur International Symposium on Science and Technology (BIS-STE 2020)*, Atlantis Press, pp. 72–82, 2021.
- [2] E. Gunnlaugsson, H. Ármannsson, S. Thorhallsson, and B. Steingrímsson, "Problems in geothermal operation - scaling and corrosion," *roc. Santa Tecla Workshop, El Salvador*, pp. 1–8, 2014.
- [3] M. H. Dickson and M. Fanelli, "Geothermal Energy: Utilization and Technology," *Paris: UNESCO Publishing*, 2004.
- [4] K. Nicholson, "Geothermal Fluids: Chemistry and Exploration Techniques," *Berlin: Springer-Verlag*, 1993.
- [5] 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.
- [6] A. Sofyan, J. Szanyi, and H. S. Aka, "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.
- [7] 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.
- [8] A. Sofyan, J. R. 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.
- [9] A. Sofyan, "Scale formation and treatment plan in Indonesian geothermal wells," *Ph.D. dissertation, Dept. Geology, University of Szeged, Hungary*, 2025.
- [10] B. Köhl, M. Elsner, and T. Baumann, "Hydrochemical and operational parameters driving carbonate scale kinetics at geothermal facilities," *Geothermal Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 1–23, 2020.
- [11] R. O. Fournier and A. H. Truesdell, "An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters," *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 37, no. 5, pp. 1255–1275, 1973.
- [12] D. L. Parkhurst and C. A. J. Appelo, "Description of input and examples for PHREEQC version 3—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations," *U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 6, Ch A43*, 2013.
- [13] I. Gunnarsson and S. Arnórsson, "Impact of silica scaling on the efficiency of heat extraction from high-temperature geothermal fluids," *Geothermics*, vol. 34, no. 3, pp. 320–329, 2005.

- [14] A. Sofyan, Y. D. G. Bujang, and D. C. Dewi, "Analysis Of The Z Well Production Test Using The Horizontal Lip Pressure Method At PT. Pertamina Geothermal Energy Ulubelu Area," *Indonesian Journal of Energy and Mineral*, vol. 3, no. 1, pp. 40–55, 2023.
- [15] A. Sofyan, H. S. Aka, and M. B. Ermanda, "Redesign Of Well Pad "X" Geothermal Separator with Demister Pad to Increase Separator Efficiency to Get Maximum Steam and Brine Separation in the Field "Y"," *Der Digital German Geothermie Kongress 2020*, pp. 1–15, 220AD.
- [16] R. DiPippo, "Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact," *3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann*, 2012.

Daftar Simbol

μ	= Rata – rata
σ	= Standar deviasi
IAP	= Ion Activity Index
CSI	= Calcite Saturation Index
T	= Temperature
SSI	= Silica Saturation Index